UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação

Autor: **Robson de Camargo**

Orientador: **Olívio Novaski**

50/2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação

Autor: **Robson de Camargo**
Orientador: **Olívio Novaski**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008.
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C14v	Camargo, Robson de Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação / Robson de Camargo. --Campinas, SP: [s.n.], 2008. Orientador: Olívio Novaski Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1. Metais – Usinabilidade. 2. Aço inoxidável austenítico. 3. Materiais resistentes a corrosão. I. Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of the machinability of austenitic stainless steel through the drilling process

Palavras-chave em Inglês: Drilling, Machinability, Austenitic stainless steel, TiN coating
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Marcos Valério Ribeiro
Data da defesa: 04/06/2008
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação

Autor: Robson de Camargo
Orientador: Olívio Novaski

____
Prof. Dr. Olívio Novaski - Universidade Estadual de Campinas

____
Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz - Universidade Estadual de Campinas

____
Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro – Faculdade de Engenharia do Campus de Graratinguetá - UNESP

Campinas, 04 de junho de 2008.

Dedicatória

A Edilaine, minha esposa, e minha filha Vitória, que tem dado força, carinho e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Aníbal de Camargo e Maria Apparecida Barreto de Camargo, pela formação da pessoa que sou.

Ao meu irmão José Rubens de Camargo, que sempre me incentivou, principalmente nos momentos de desânimo.

Ao meu sogro Newton Dias da Silva que sempre acreditou em mim e sempre me deu ânimo nos momentos difíceis.

Aos meus amigos Aldeci Vieira dos Santos e Francisco Marcondes da SANDVIK do Brasil S.A., sempre prontos nos momentos que precisei.

Ao meu grande amigo e companheiro do Senai Paulo César Pigato, que não mede esforços em me ajudar.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Olívio Novaski, que me recebeu nesta Universidade e com quem eu pude contar em cada uma das etapas de elaboração deste trabalho.

Ao Centro SENAI Fundação Romi Formação de Formadores que através do Diretor Prof. Cláudio Rafael Teti, do Coordenador Pedagógico Prof. Marcio Antonio Barbosa e do Prof. Dr. Jorge Antonio Giles Ferrer, me forneceram apoio técnico e equipamentos necessários para a execução dos ensaios.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia de Fabricação, em especial a Sra. Vera Pontes, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Materiais, que ajudaram de forma direta e indireta nas análises dos materiais e ferramentas envolvidos neste trabalho.

Aos Engos. Celso Barbosa, Alexandre Sokolovski e todos os técnicos do Centro de Pesquisa da Villares Metals S.A. pelo apoio material e técnico.

Ao meu grande amigo Engo. Davi Neves que, com sua grande experiência, disposição e prontidão me apoiou no delineamento e execução dos ensaios.

Ao meu amigo Engo. Carlos César de Castro Deonísio, pelo apoio técnico.

Ao meu amigo Engo. José Roberto Nunes do Espírito Santo que desenvolveu o hardware e software para a digitalização da potência consumida na máquina.

À Empresa Adleer Lubrificantes, especialmente ao engenheiro químico Antonio Maria pelo apoio material e técnico.

"Eduque os meninos... e não será preciso castigar os homens".

Pitágoras

Resumo

CAMARGO, Robson de, Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 118 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).

Graças a suas propriedades mecânicas e a boa resistência à corrosão, os aços inoxidáveis austeníticos representam aproximadamente 70% de todo o aço inoxidável produzido. O aço ABNT 304 tem excelente resistência à corrosão, alta resistência ao ataque de agentes corrosivos e possui boa tenacidade em baixas temperaturas. A condutibilidade térmica, todavia, corresponde a ¼ do aço ao carbono, tanto que o calor gerado durante a usinagem não é transferido ao material ou aos cavacos e sim se concentra na aresta de corte, e a alta tenacidade dos mesmos torna difícil sua saída devido ao alongamento. O mecanismo de encruamento, que é um fenômeno que acontece próximo da aresta de corte, piora a usinabilidade do aço inoxidável. O aço inoxidável, com controle metalúrgico das inclusões e adição de cálcio, é apresentado como uma alternativa, em termos de usinagem, sem perda de resistência à corrosão. O presente trabalho compara, por meio do processo de furação, a usinabilidade do aço ABNT 304 com o aço similar, V304 UF, com adição de cálcio e controle de inclusões. Foram utilizadas brocas de aço rápido recobertas com TiN nos dois diferentes aços com velocidades de corte diferentes para avaliar o efeito da adição de cálcio na usinabilidade. A possível formação da camada protetiva na superfície da ferramenta de aço rápido com revestimento de TiN foi encontrada. Após testes de usinagem, a presença de cálcio e elementos de liga na superfície da ferramenta foi constatada usando a análise por difração de raios X. Com as análises dos resultados obtidos na medição da força de avanço, momento de torção e vida da ferramenta, fica evidente afirmar que a usinabilidade do aço inoxidável Villares 304 UF foi superior.

Palavras chaves. Furação, usinabilidade, aço inoxidável austenítico, revestimento de TiN.

Abstract

CAMARGO, Robson de, E*valuation of the Machinability of Austenitic Stainless Steel through the drilling process,* Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 2008. 118p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).

Thanks to its mechanical properties and good corrosion resistance embraced, the austenitic stainless steels represent about 70% of all kind stainless steel produced. The ABNT 304 steel has excellent corrosion resistance the in the environment, high resistance to attack of corrosive agents and keep good tenacity in low temperatures. Unfortunately the of heat conduction is about 1/4 that of regular steel, so much of the heat generated during machining is not transferred to the work material or the chips and concentrate on the cutting edge, and high malleability that indicates softness and tenacity makes chip evacuation difficult due to chip elongation. Yet the work hardening, a phenomenon that occurs near the cutting edge gives poor machinability to the stainless steel. The stainless steel with metallurgical control of the inclusions and calcium addition is presented as alternative, without loss of corrosion resistance. The present work compares the machinability of ABNT 304 steel with the similar steel, Villares 304 UF, with calcium addition using the drilling process. HSS TiN coated twisted drills had been used in the two different steels with different cutting speeds to evaluate the effect of the calcium addition in the machinability. The possible formation of a protective layer on the surface the tool of TiN-coated HSS was found. After cutting tests, the enrichment of calcium and alloying elements in the surface of the tool was studied using energy dispersive X-ray spectrometry. The feed force, torsion moment and tool life measured allow to explain the upper machinability of the stainless steel Villares 304 UF.

Keywords: Drilling, machinability, austenitic stainless steel, TiN coating.

Índice

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Nomenclatura

Letras Latinas

n – rotação do eixo-árvore	[rpm]
$\mathbf{V_B}$ – desgaste de flanco	[mm]
$\mathbf{v_c}$ – velocidade de corte	[m/min]
T – vida da ferramenta	[min]
Ff – Força de avanço	[N]
Mt – Momento torsor	[N.cm]
Fn – Avanço por volta	[mm/min^{-1}]
ap – Profundidade de usinagem	[mm]
Ry – Rugosidade máxima	[µm]
Ks – Pressão específica de corte	[N/mm^2]

Abreviações

$\mathbf{Al_2O_3}$ – Óxido de alumínio
CVD - Chemical Vapor Deposition – Deposição Química a Vapor
PVD – Physical Vapor Deposition
TiN – Nitreto de titânio
UF – Usifac - Usinagem facilitada - Marca Registrada da Villares Metals S/A
CNC – Controle Numérico Computadorizado
HSS – High Speed Steel – Aço rápido
Fe – Ferro
C - Carbono
Cr – Cromo
Si – Silício
Mn – Manganês
Si - Silício
P – Fósforo
S – Enxofre
Se - Selênio
Zr – Zircônio
Mo – Molibdênio
Cu – Cobre
Ca – Cálcio

CaS – Sulfeto de cálcio
MgO – Óxido de magnésio
MnO – Óxido de manganês
TiO_2 – Dióxido de titânio
JIS – Conjunto de normas - Japão
J - Joule
K – Kelvin
m^2 – Metro quadrado
Al – Alumínio
MnS – Sulfeto de manganês
HV – Hardness Vickers – Dureza Vickers
μm – Milésimo de milímetro
CaO – Óxido de cálcio
SiO_2 – Dióxido de silício
AISI - American Iron and Steel Institute – Instituto Americano do Ferro e Aço
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM – International Handbook Committ
ISO – International Standard Organization
DIN – Conjunto de normas - Alemanha
Kgf/cm^2 – Quilograma-força por centímetro quadrado
MPa –Mega Pascal
P10 e P20 – Classe de metal duro segundo a norma ISO
W/m^oC – Condutividade térmica
kW – Quilowatt
l/min – Litro por minuto
m/min – metro por minuto
mm/min - Milímetro por minuto
min^{-1} – Freqüência de giro
mm/min^{-1} – milímetro por revolução
F_f – Força de avanço
N – Newton
Cm – Centímetros
m – Metro
mm – Milímetros
^oC – Grau celsius
c e n – Coeficientes experimentais de Taylor
V_{20} – Velocidade de corte da ferramenta para uma vida de 20 minutos
W - Watt
AE – Acoustic Emission – Emissão acústica
Bi – Bismuto
CV – Cavalo-vapor
CLP - Controlador lógico programável
SAE - Society of Automotive Engineers – Sociedade dos Engenheiros Automotivos
AFNOR - Association Française de Normes – Associação Francesa de Normas
HR – Hardness Rockwell – Dureza Rockwell
MEV – Microsópio Eletrônico de Varredura
Hz – Hertz

Log – Logaritmo
Kg – Quilograma
KV – Quilovolt

CAPÍTULO 1

Introdução

O atual cenário da globalização tem mostrado crescentes disputas entre os países industrializados pela conquista de mercados. Uma das conseqüências deste fato é a redução ao mínimo das margens de lucro dos produtos (DÖRR e ECKARD, 2001b).

A busca pelo aumento da produtividade, visando a redução dos custos de produção, tem se tornado um parâmetro diferencial na otimização do custo final do produto, principalmente quando se trata de aços inoxidáveis e, em especial, dos aços inoxidáveis austeníticos.

Esses aços são de grande interesse para a engenharia, em função de sua resistência à oxidação e à corrosão, propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade (SILVA e MEI, 2006). Contudo, devido ao campo plástico e à elevada taxa de encruamento, estes aços produzem cavacos longos, e, quando solicitados mecanicamente, encruam formando a aresta postiça de corte (DINIZ e CUPINI, 1986).

Alguns procedimentos foram desenvolvidos para melhorar os baixos índices de usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, tais como o controle da morfologia das inclusões e a adição de elementos de liga, sem comprometer as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão (FONSECA, BARBOSA e ABRÃO, 2002).

Entre os processos de usinagem, a furação é um dos mais importantes processos de manufatura. Independentemente da sua finalidade, de maneira geral, as peças apresentam pelo menos um furo, sendo que uma pequena parcela já vem com um furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc).

É importante ressaltar que o processo de furação é enclausurado, dificultando a refrigeração e a extração do cavaco, procedimentos importantes para o sucesso da operação. Qualquer falha na retirada do cavaco pode causar o entupimento das superfícies de saída da broca, e, no caso de materiais dúcteis, pode causar defeitos na superfície do furo.

Devido ao processo de furação ser amplamente utilizado; novos avanços tecnológicos têm acontecido, o que levou ao desenvolvimento de novas geometrias e coberturas de brocas elevando assim, o nível da produtividade (DÖRR e ECKARD, 2001a).

Em face do exposto, colocou-se como objetivo deste trabalho uma análise comparativa da usinabilidade no processo de furação dos aços ABNT 304 e do aço denominado de V304 UF, desenvolvidos pela VILLARES Metals S.A.. O teste de usinabilidade proposto compreende as seguintes análises:

- O comportamento do desgaste das brocas;
- Os esforços de corte;
- A averiguação das superfícies de folga e de saída, com o intuito de se encontrar vestígios de material nas superfícies referidas.

Para a consecução do objetivo proposto, o presente trabalho foi estruturado como segue:

✓ **Capítulo I**: Introdução.

✓ **Capítulo II**: Conceituação Teórica — neste capítulo são apresentados trabalhos desenvolvidos nos processos de usinagem, principalmente em furação, suas características e as propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos.

✓ **Capítulo III**: Materiais, Equipamentos e Procedimentos experimentais — neste capítulo são descritos os materiais, os equipamentos, as ferramentas e o método empregado na parte experimental deste trabalho.

✓ **Capítulo IV**: Resultados e Discussão — neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

✓ **Capítulo V**: Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros — neste capítulo são apresentadas às conclusões oriundas do presente trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos formam o maior grupo de aços inoxidáveis em uso, representando cerca de 65 a 70% do total produzido. Apresentam estrutura predominantemente austenítica, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Contém entre 6 e 26% de níquel, 16 e 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono, com um teor total de elementos de liga de, pelo menos, 26%.

Essa classe inclui, principalmente, ligas Fe-Cr-Ni, embora existam ligas onde parte da porcentagem do níquel foi substituída por manganês e nitrogênio. À temperatura ambiente, possuem um baixo limite de escoamento, e elevado limite de resistência e ductilidade. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência à corrosão.

Muitas são as utilizações desses aços, como na indústria química, alimentícia, refino de petróleo e em diversos outros casos em que, boa resistência à corrosão, facilidade de limpeza e ótimas características de fabricação são necessárias (MODENESI, 2001).

A Tabela 2.1 mostra o resumo de alguns tipos desses aços, classificados segundo a norma AISI (CHIAVERINI,1977).

Tabela 2.1- Composição química (% em peso) e aplicações de alguns aços inoxidáveis austeníticos (CHIAVERINI, 1977).

AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades Gerais e Aplicações Típicas
301	0,15	16,0 18,0	6,0 8,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo para aplicações gerais; boa condição de trabalho; ornamentação, utensílios domésticos, fins estruturais; equipamentos para a indústria química, naval, alimentícia, transportes, etc.
302	0,15	17,0 19,0	8,0 10,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Idem, para aplicações decorativas ou de resistência à corrosão como as indicadas para o tipo 301
302B	0,15	17,0 19,0	8,0 10,0	Mn: 2,0 max. Si: 2,0 a 3,0	Melhor resistência à formação da camada de óxido a altas temperaturas devido à presença de Si.
303	0,15	17,0 19,0	8,0 10,5	P/S/Se: 0,07 min Zr/Mo: 0,06 max. Si: 1,0 max. Mn: 2,0 max.	Tipo 18:8 de usinagem fácil, para eixos, parafusos, porcas, peças de carburadores, etc.
304	0,08	18,0 20,0	8,0 11,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 Max	Tipo 18:8 de C mais baixo, soldável com menor perigo de corrosão intercristalina, mesmas aplicações dos tipos 301 e 302.

Os aços inoxidáveis austeníticos mais utilizados são os 18-8 em que o teor médio de cromo é 18% e o de níquel 8% (CHIAVERINI, 1990). A introdução do níquel melhora consideravelmente a resistência à corrosão e a resistência à oxidação em altas temperaturas, visto que, o níquel é mais nobre que o ferro e, além disto, forma uma camada de óxido que protege o aço.

As características principais dos aços inoxidáveis austeníticos são:

- não magnéticos;
- não endurecíveis, por serem austeníticos;
- quando encruados, apresentam um fenômeno interessante: o aumento de dureza que se verifica é bem superior ao que se encontraria, mediante a mesma deformação, em outros aços. Este aumento, além do usual da dureza, pode ser atribuído à instabilidade da austenita que, sob o efeito das tensões do encruamento, transforma-se parcial e paulatinamente em ferrita. Esta ferrita, supersaturada de carbono, nas mesmas condições que uma martensita, contribui para o endurecimento excepcional do aço. O estiramento a frio, como por exemplo, do aço 18-8, pode produzir resistência à tração da ordem de 250 kgf/mm^2 (2.450 MPa); com uma porcentagem de deformação idêntica, se aplicada em um aço comum, não produziria mais do que cerca de 140 kgf/mm^2 (1.370 MPa).

Um reaquecimento a temperaturas moderadas do aço encruado – que se encontrará no estado ferrítico – restaura a austenita.

Nota-se ainda nos aços inoxidáveis austeníticos que, à medida que o teor de níquel aumenta, o efeito do encruamento é menos pronunciado, tendo em vista a ação estabilizadora deste elemento.

A importância desse fenômeno é tão grande que se costuma classificar os aços austeníticos pelos níveis de resistência que se consegue pelo encruamento, desde o tipo recozido dúctil até o tipo inteiramente duro (CHIAVERINI, 1990).

Os aços austeníticos podem ser considerados como aqueles que são mais difíceis de serem usinados (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). Além dos fatores acima citados, outras características que dificultam a usinagem dessas ligas são:

- Baixa condutividade térmica que dificulta a extração do calor da região de corte, provocando maior desgaste na ferramenta;
- Alto coeficiente de atrito, que como conseqüência gera aumento do esforço e do calor;
- Alto coeficiente de dilatação térmica, o que torna difícil a manutenção de tolerâncias apertadas;
- Elevado tensão de ruptura.

A usinabilidade desses aços é tanto melhor quanto mais estável for a austenita e quanto menor o teor das inclusões não metálicas. Um aço inoxidável austenítico com tamanho de grão austenítico grande pode, na maioria dos casos, ser usinado com velocidades de corte mais elevadas do que o mesmo aço com tamanho de grão austenítico menor.

Como os aços inoxidáveis austeníticos possuem uma grande resistência à deformação, ocorre uma elevada força específica de corte, sendo que a máquina-ferramenta deve ser suficientemente rígida para suportar o esforço. O desgaste da ferramenta aumenta sensivelmente com o acréscimo de carbono nesses aços, pois adições maiores de carbono favorecem a formação de carbonetos estáveis dificultando a usinagem.

As dificuldades de usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos normalmente concentram-se em (TESSLER e BARBOSA, 1993):

- Forte desgaste das ferramentas com baixa qualidade de acabamento superficial;
- Péssima característica da saída de cavaco (quebra), causando congestionamento em centros de usinagem;
- Baixas velocidades de corte levando a baixa produtividade.

Durante o corte, forma-se uma camada encruada de alta resistência que se opõe ao avanço da ferramenta. Simultaneamente, a formação de cavacos contínuos, causada pela alta ductilidade do material e o atrito elevado na interface metal/ferramenta causa um aquecimento na região de corte. Os aços inoxidáveis, não dissipam efetivamente o calor gerado, por terem uma baixa condutibilidade térmica. O aquecimento excessivo acaba comprometendo a vida da ferramenta e conseqüentemente a qualidade superficial da peça usinada, havendo necessidade de reduzir a velocidade de corte. Além disto, em alguns casos, existe forte tendência ao caldeamento entre a ferramenta e a peça que está sendo usinada.

A usinabilidade dos aços inoxidáveis é influenciada por diversos fatores. Nos aços austeníticos, o aumento do teor de níquel, cromo ou molibdênio causa perda de produtividade na usinabilidade, já a presença de fósforo ou cobre beneficia-a. Quanto aos elementos intersticiais, tanto a presença do carbono como a do nitrogênio, prejudicam a usinabilidade por aumentar a resistência do material e formar partículas duras e abrasivas. O efeito destes elementos é mostrado na Figura 2.1 (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

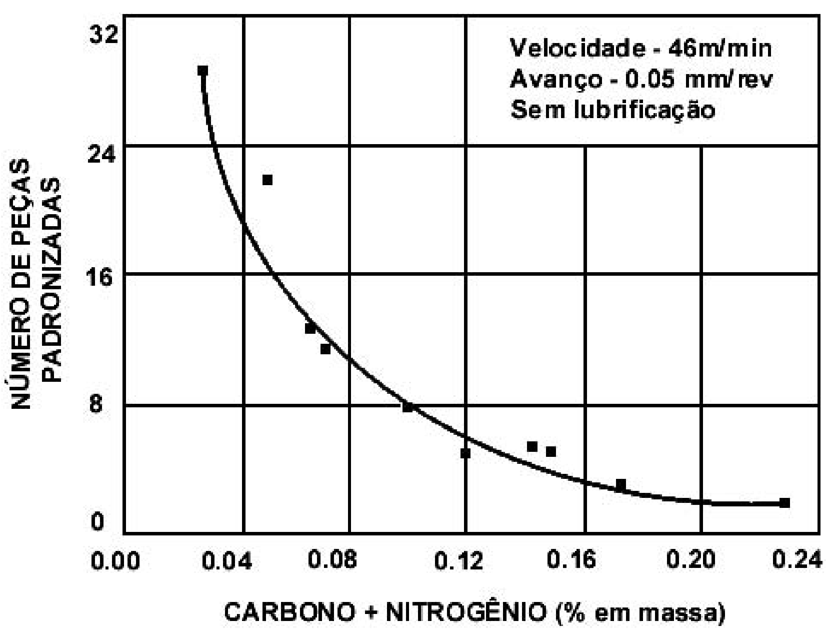


Figura 2.1 – Efeito de teor de carbono e nitrogênio na usinabilidade de um aço 18Cr-9Ni-3Mn (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

Normalmente, a melhor usinabilidade está associada a uma condição de baixa dureza (e resistência) e baixa ductilidade. Porém, os aços inoxidáveis austeníticos no estado solubilizado (recozido) apresentam alta taxa de encruamento e alta ductilidade. Trabalho a frio provoca queda ainda maior na usinabilidade, como mostra na Figura 2.2 (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

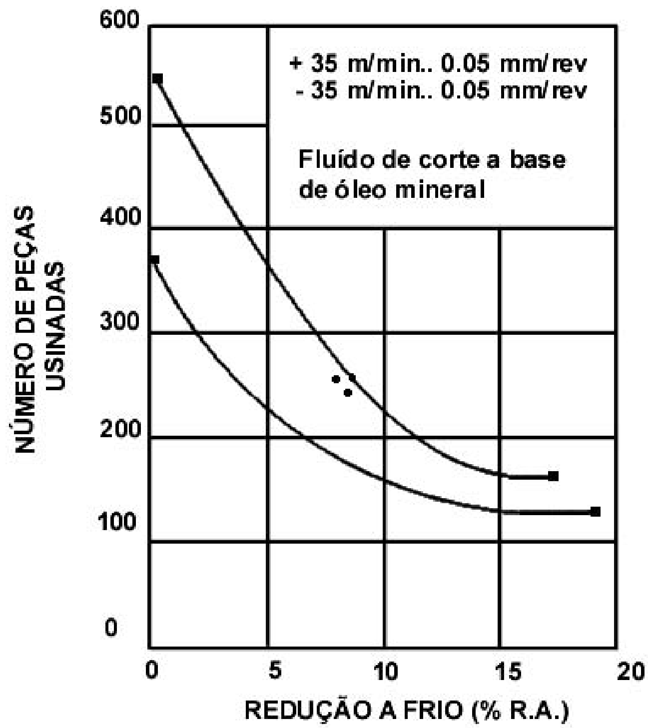


Figura 2.2 – Efeito da redução a frio na usinabilidade de um aço AISI 304 (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

A presença de inclusões influencia a usinabilidade de acordo com a sua composição. Os óxidos, principalmente a alumina, são duros e abrasivos, e, portanto, prejudicam a usinabilidade.

Já o sulfeto de manganês é mole e deformável, sendo bastante benéfico para a usinabilidade. O aumento da relação entre teor de manganês e enxofre provoca um aumento da fração volumétrica de inclusões, amolecimento dos sulfetos e melhora na usinabilidade nos aços inoxidáveis (KOVACH e MOSKOWITZ, 1969).

2.1.1 Adição de elementos nos aços inoxidáveis austeníticos

Muitos são os métodos para melhoria da usinabilidade dos aços inoxidáveis, tal como para os aços destinados à construção mecânica. O método mais conhecido e utilizado é a adição de enxofre ao aço, que conduz à formação de sulfetos de manganês na matriz. Inclusões como esta possuem baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, tendo um efeito positivo na usinabilidade.

Estas inclusões causam um efeito lubrificante na aresta de corte e facilitam a quebra do cavaco na zona de cisalhamento. Há outros métodos que utilizam a adição de elementos como o selênio, chumbo, telúrio e bismuto. Entretanto, na maioria das vezes, a melhoria da usinabilidade é muitas vezes acompanhada da queda de outras propriedades. Em particular, as seguintes propriedades poderão ser prejudicadas (FERRARESI, 1986):

- Resistência à corrosão;
- Ductilidade e tenacidade na direção transversal;
- Plasticidade a quente e a frio;
- Soldabilidade.

Nos últimos anos, tem-se utilizado a técnica de controle das inclusões dos óxidos para melhorar a usinabilidade, sem deterioração das outras propriedades. Isto é alcançado por meio de tratamento especial durante a fabricação do aço líquido.

2.1.2 Adição de Enxofre

O enxofre forma sulfeto de manganês, contendo cromo e ferro. Os sulfetos que são maiores e mais globulares são mais benéficos para a vida da ferramenta do que os menores e mais alongados (ASM METALS HANDBOOK, 1989). É o principal elemento usado para aumentar a usinabilidade. A quantidade de enxofre que pode ser adicionada é limitada pela queda na plasticidade a quente do aço. Também existe grande perda da resistência à corrosão.

A Figura 2.3 mostra que a usinabilidade ou a penetração da broca nos aços é aumentada com o aumento da porcentagem do teor de enxofre.

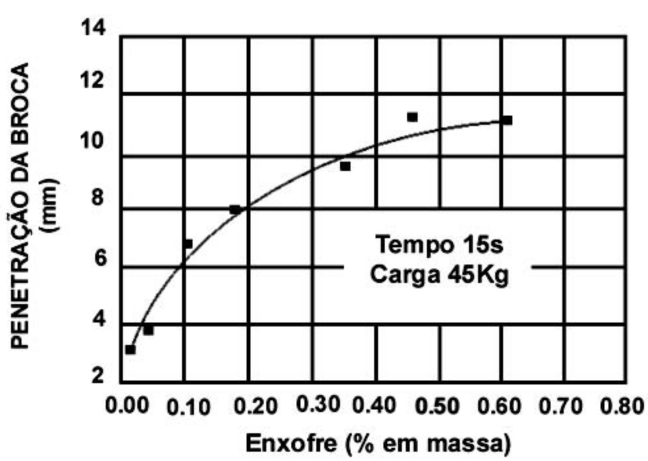


Figura 2.3 – Efeito do teor de enxofre na usinabilidade de um aço 18Cr-9Ni, avaliada pelo teste de furação (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

Conseqüentemente, fixando a velocidade e o avanço na usinagem, quanto maior a porcentagem de enxofre maior será a produtividade (número de peças usinadas), dentro dos limites permissíveis para os aços não ressulfurados, conforme mostrado na Figura 2.4 (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

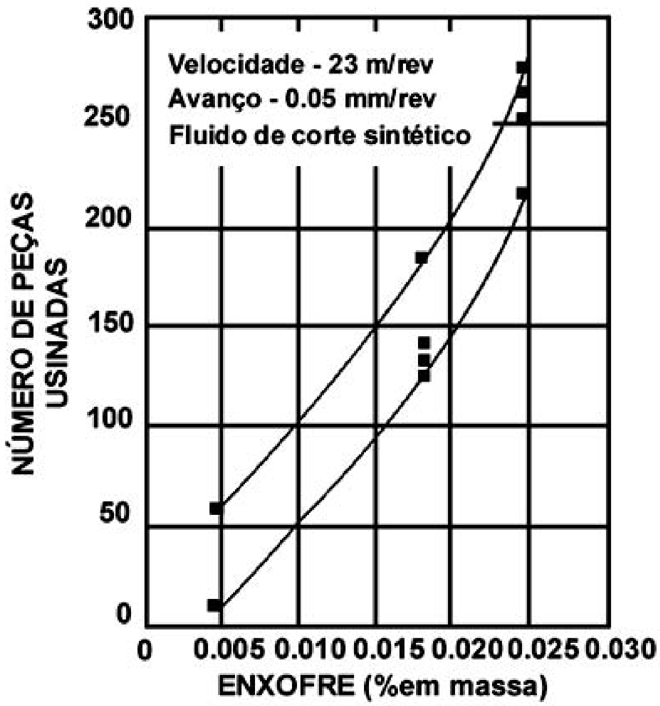


Figura 2.4 – Efeito do teor de enxofre na usinabilidade do aço AISI 304 (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

2.1.3 Adição de Chumbo, Telúrio e Selênio

O chumbo possui baixa solubilidade e forma inclusões metálicas que são benéficas a usinabilidade. As partículas de chumbo atuam como lubrificante reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça usinada. Além disso, elas fragilizam e facilitam a quebra do cavaco.

Em alguns casos o chumbo é usado junto com o enxofre para melhorar ainda mais a usinabilidade do aço inoxidável ressulfurado. O chumbo tem alta pressão de vapor e seus gases são tóxicos, por isso, cuidados especiais de exaustão devem ser tomados na aciaria. A adição deste elemento provoca queda da plasticidade a quente.

O telúrio forma inclusões similares aos sulfetos, e tem-se mostrado mais efetivo que o enxofre na melhoria da usinabilidade dos aços inoxidáveis. O teor adicionado é aproximadamente 0,1% e ocorre queda na plasticidade a quente.

O selênio forma inclusões análogas aos sulfetos, mas é menos efetivo que o enxofre quando adicionado na mesma quantidade. Por outro lado, em alguns casos os aços com selênio apresentam melhor plasticidade a frio e melhor resistência à corrosão que os aços ressulfurados.

O selênio, da mesma forma que o telúrio e o chumbo, exigem cuidados especiais, pois alguns de seus compostos são bastante tóxicos (ASM METALS HANDBOOK, 1989; ABORN, 1977), o que tem limitado a sua utilização.

2.1.4 Adição de Bismuto

Essa adição também possui baixa solubilidade e forma inclusões metálicas que são benéficas a usinabilidade. O bismuto provoca queda na plasticidade a quente. No entanto, a plasticidade a frio é superior aos dos aços ressulfurados. As propriedades mecânicas e a resistência à corrosão são praticamente inalteradas pela adição desse elemento em teores residuais (KIMURA, *et al.,* 1986).

O bismuto tem alta pressão de vapor, mas seus gases não são tóxicos, sendo considerado um dos mais seguros entre os metais pesados, o que ficou comprovado quando foi utilizado em cosméticos e remédios (OCCUPATIONAL DISEASES, 1977). As partículas de bismuto atuam na usinagem, de modo similar às partículas de chumbo, reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça (ASM METALS HANDBOOK, 1989; ABORN, 1977).

2.1.5 Controle da Morfologia das Inclusões

A partir do controle da desoxidação dos aços inoxidáveis pode-se obter um aumento da usinabilidade. O objetivo é a formação de óxidos de baixo ponto de fusão no lugar de inclusões duras do tipo alumina (TESSLER & BARBOSA, 2002). Estes óxidos atuam de forma parecida com os sulfetos: formam, especialmente durante a usinagem com metal duro, um filme lubrificante sobre a aresta de corte, devido às altas temperaturas desenvolvidas (1000°C a 1250°C) e favorecem a quebra dos cavacos.

As inclusões não metálicas possuem uma composição química situada na região de inclusões maleáveis do diagrama ternário Al_20_3, Ca0 e SiO_2. Essas inclusões são menores e menos abrasivas do que as inclusões de alumina. Além disto, forma-se uma camada de sulfeto de cálcio e manganês envolvendo as inclusões de óxidos (TESSLER & BARBOSA, 2002). As propriedades mecânicas e a resistência à corrosão ficam praticamente as mesmas. Como neste

método não existem elementos de liga adicionais, os aços retêm a sua especificação original (TIPNIS e JOSEPH, 1975).

2.1.6 Desenvolvimento do aço inoxidável de usinagem facilitada

O uso do aço ressulfurado como solução para a melhoria da usinabilidade nos aços inoxidáveis tem o inconveniente de comprometer as outras propriedades, como a resistência à corrosão. Por exemplo, muitas vezes é almejada maior usinabilidade dos aços AISI 304 e AISI 316, mas não se pode usar o AISI 303 devido a sua baixa resistência à corrosão ou quando as especificações não permitem, como por exemplo, nos equipamentos para as indústria de bebidas ou alimentos.

Nesse contexto, em 1992, a Villares Metals S/A desenvolveu aços inoxidáveis com usinabilidade melhorada sem comprometimento das outras propriedades. Esta linha de aços inoxidáveis foi denominada USIFAC ® e (USInagem FACilitada). A usinabilidade melhorada é obtida pelo controle da composição química e pela técnica de desoxidação na fabricação do aço.

A linha USIFAC ® é resultado de desenvolvimento do processo de fabricação do aço, o que possibilita a obtenção de inclusões com características específicas: redução da quantidade de inclusões duras e abrasivas, o controle de distribuição e morfologia das inclusões do sulfeto de manganês e formação de oxissulfetos mistos com baixo ponto de fusão. Com isto, obtém-se um efeito lubrificante na ferramenta e uma quebra de cavacos favorecida, que ocorrem durante o processo de usinagem, devido às elevadas temperaturas geradas nas pontas das ferramentas, especialmente quando se empregam pastilhas de metal duro em altas velocidades de corte.

A Figura 2.5 mostra as curvas de desgaste da ferramenta no torneamento dos aços V304 UF e 304 convencional. O desgaste no aço 304 UF é sempre inferior. Além disto, observou-se que no torneamento do V304 UF ocorre menos vibração, menor aquecimento e o melhor acabamento superficial da peça. O mesmo resultado foi obtido para o aço V316 UF e V 316 convencional, Figura 2.6, e para o V630 UF e V630 convencional, Figura 2.7 (TESSLER e BARBOSA, 2002).

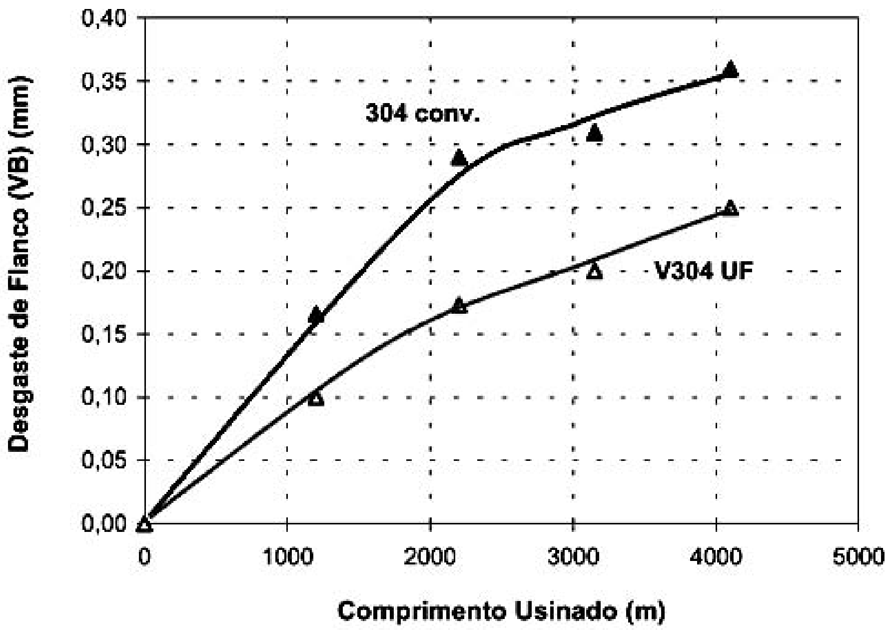


Figura 2.5 – Curva de desgaste da ferramenta no torneamento de barras V304 UF e 304 convencional. Pastilha de metal duro P30, velocidade igual a 150 m/min, avanço igual a 0,25 mm/rev. e profundidade de corte igual a 1 mm (TESSLER e BARBOSA, 2002).

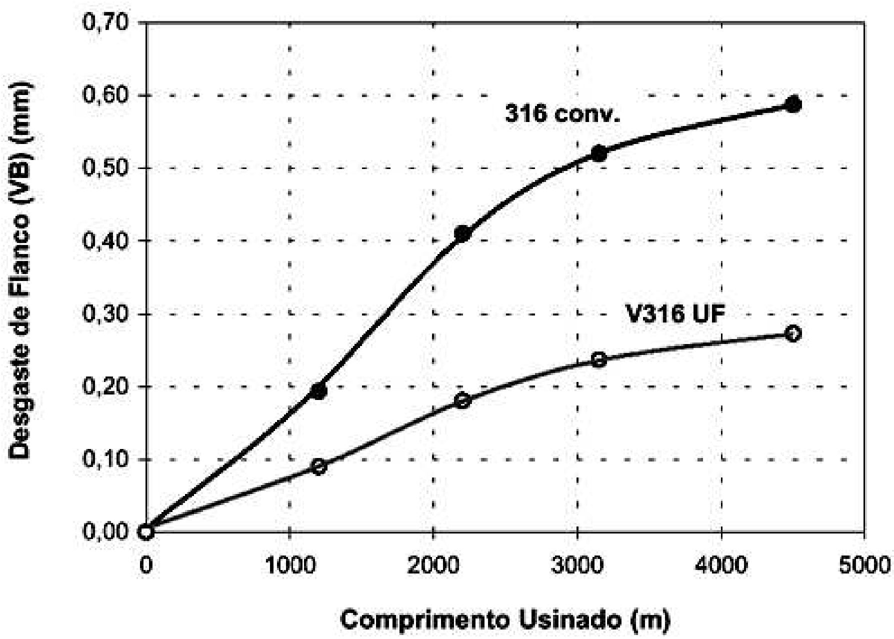


Figura 2.6 – Curvas de desgaste da ferramenta no torneamento de barras V316 UF e 316 convencional. Pastilhas de metal duro P30, velocidade igual a 150 m/min., avanço igual a 0,25 mm/rev. e profundidade de corte igual a 1 mm (TESSLER e BARBOSA, 2002).

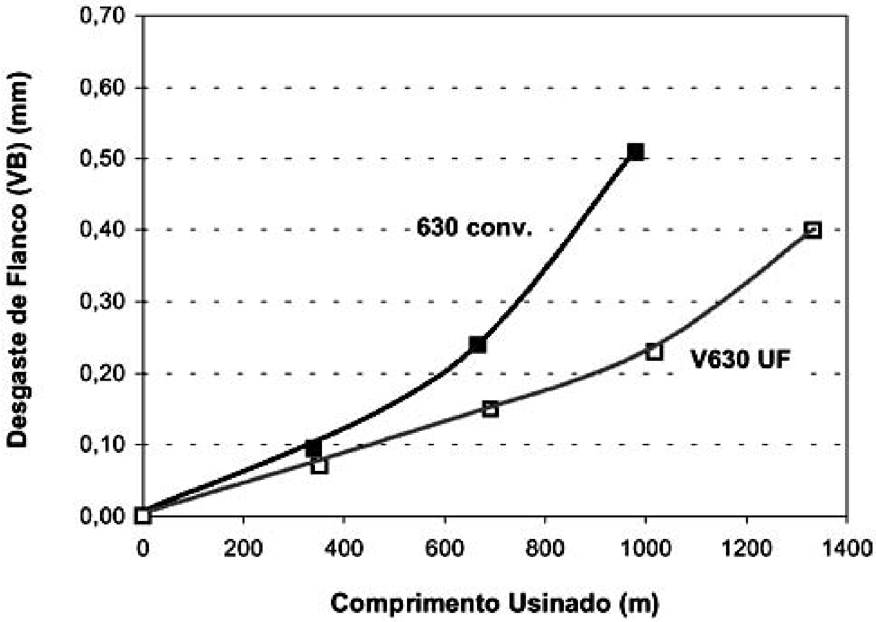


Figura 2.7 – Curvas de desgaste da ferramenta no torneamento de barras V630 UF e 630 convencional. Pastilhas de metal duro P30, velocidade igual a 120 m/min., avanço igual a 0,25 mm/rev. e profundidade de corte igual a 1mm (TESSLER e BARBOSA, 2002).

Os cavacos dos aços 304 convencional e V304UF, após o torneamento, são mostrados na Figura 2.8. No caso do V304 UF, os cavacos são menores e menos oxidados. Na usinagem com o aço V304 UF, o atrito com a ferramenta é minimizado e, assim, ocorre diminuição da temperatura na ponta da ferramenta com conseqüente redução do desgaste.

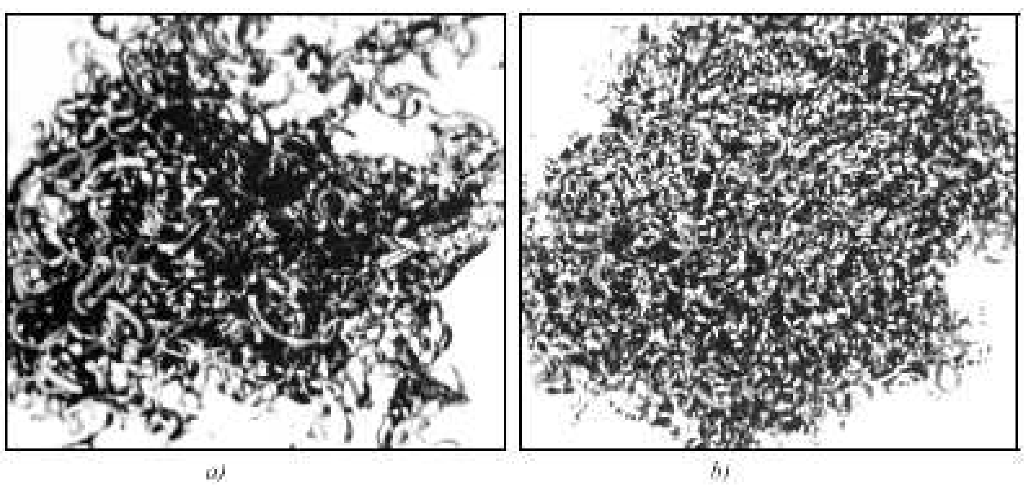


Figura 2.8 – Cavacos após o ensaio de torneamento (a) 304 convencional e (b) V304 UF (TESSLER e BARBOSA, 2002).

2.2 Conceito e Avaliação da Usinabilidade

Quando abordamos o conceito de usinabilidade, devemos levar em conta que este não se refere a uma única propriedade do material, que pode ser claramente definida e mensurada (BHATTACHARYA, 1988). A usinabilidade deve ser entendida como um sistema de propriedades dependentes de interações complexas e dinâmicas entre os materiais da peça e da ferramenta, do fluido e das condições de corte. Assim, ao se proporcionar uma melhoria da usinabilidade, a conseqüência será em algum dos fatores abaixo relacionados (TRENT, 1989):

- Aumento da vida útil da ferramenta de corte;
- Maior taxa de remoção do material que está sendo usinado;
- Melhoria do acabamento superficial;
- Melhor controle na formação do cavaco;
- Diminuição das forças de corte.

A Tabela 2.2 relaciona o tipo de aço inoxidável com suas características e usinabilidade. Podemos concluir que os aços inoxidáveis do tipo austenítico, devido à grande tendência a formação de aresta postiça de corte e à dificuldade de remoção do cavaco (delgado e aderente) e o duplex, por ser limitado pelo alto nível de resistência mecânica e apresentar elevado nível de dureza, apresentam as piores condições para serem usinados (GENNARI e MACHADO, 1999).

Os ensaios de usinabilidade não são apenas importantes para comparar esta característica em diversos materiais. Eles possibilitam a definição de condições de usinagem que resultarão em ganho de produtividade e redução de custos.

A escolha do tipo de ensaio é baseada no tipo de aço, operação de usinagem e objetivo do estudo. Em muitos casos são realizados vários testes no mesmo material. Isto é necessário, pois a usinabilidade é uma propriedade do sistema e depende das condições de usinagem.

Tabela 2.2 - Classificação dos aços inoxidáveis. (GENNARI e MACHADO, 1999).

Grupos (Principais classes)	Características Gerais	Usinabilidade
Ferríticos (ABNT 430, 430F, 431, 444)	Endurecidos por deformação a frio. Larga faixa de resistência à corrosão (de moderada a boa). Ductilidade relativamente boa.	Melhor para aquelas com baixos teores de Cr. Cavacos bastante delgados e com grande deformação para ligas com maior teor de Cr.
Martensíticos (ABNT 403, 410, 416, 420F)	Normalmente temperados e revenidos. Níveis moderados de resistência á corrosão. Boa ductilidade e tenacidade.	Melhor para as ligas revenidas de baixo carbono. Forte influência do nível de dureza e dos teores de níquel e carbono.
Austeníticos (ABNT 303, 304, 304L, 310, 316, 316L)	Elevada taxa de encruamento. Resistência á corrosão de boa à excelente.Excelente ductilidade e tenacidade.	Grande tendência á formação de aresta postiça de corte. Dificuldade de remoção do cavaco (delgado e aderente). Superfície de corte endurecida.
Duplex (ferrítico + austenítico) (ABNT 318, 329, 325)	Resistência á tração duas vezes à das ligas austeníticas, sendo maior com deformação a frio. Excelente resistência á corrosão. Boa ductilidade e tenacidade.	Limitada pelo alto nível de resistência mecânica. Elevado nível de dureza. Poucas alternativas de versões de usinabilidade melhorada.
Endurecidos por precipitação (UNS-S13800, S15500)	Podem ser endurecidos a diferentes níveis de resistência. Moderada resistência á corrosão. Boa ductilidade e tenacidade.	Depende do tipo de liga e do nível de dureza. Limitada pela dureza relativamente alta, melhorada com tratamentos de revenimento.

Os primeiros ensaios de usinabilidade foram feitos por Taylor no século passado. Ele desenvolveu um procedimento no qual era determinada a velocidade de corte requerida para provocar a falha completa da ferramenta após 20 minutos.

Esta velocidade, chamada de V_{20}, é determinada pela realização de diversos ensaios, variando-se a velocidade de corte. Através destes ensaios foi estabelecida a seguinte relação empírica (TIPNIS e JOSEPH, 1975):

$$TV^n = C$$

onde:

T = vida da ferramenta (min.);

V = velocidade de corte (m/min.);

C e n = são coeficientes obtidos experimentalmente.

Segundo esse critério, quanto maior for V_{20}, maior será a usinabilidade do material.

Atualmente, o teste de usinabilidade em torneamento baseado nas idéias de Taylor é o mais conhecido e usado. A ferramenta usada dependendo do ensaio é de metal duro ou aço rápido (ASM METALS HANDBOOK, 1989). A utilização de grau e desgaste da ferramenta como critério permite uma quantificação da usinabilidade, sendo que um dos modos mais empregados é a medida do desgaste dos flancos (V_b). Em geral, utilizam-se nesses ensaios condições de usinagem severas e são por isso chamados de ensaios de curta duração.

Outro ensaio bastante usado é o de furação com força de avanço constante. O material a ser ensaiado é furado por uma broca helicoidal de metal duro sob a ação de uma força de avanço constante. O material que necessitar maior tempo para realização de um furo padronizado será aquele com menor usinabilidade (DINIZ, 1985).

Também existem testes nos quais é medido o comprimento furado até a falha da broca, ou é avaliado o desgaste da aresta de corte da broca durante a furação. Os ensaios descritos acima são feitos em laboratórios e são particulares às condições aplicadas. A maneira mais precisa para a avaliação da usinabilidade (ou comparação de materiais com pequenas diferenças) é através do acompanhamento na linha de produção, em condições reais. A desvantagem deste método é que ele envolve grande quantidade de material, tempo e tem alto custo.

Deve-se ressaltar que diferentes condições de ensaio podem dar origem a diferentes resultados de usinabilidade. Por exemplo, testes feitos com ferramentas de aço rápido dão resultados diferentes de testes com metal duro (TESSLER e BARBOSA, 2002) mecanismos diferentes estão atuando na usinabilidade. Como conseqüência, deve-se recorrer a diferentes métodos de ensaio quando se deseja avaliar um aço inoxidável novo ou modificado.

2.3 Aços inoxidáveis: dificuldades de usinagem

Os principais fatores determinantes para a baixa usinabilidade dos aços inoxidáveis são sua alta deformabilidade, elevada tensão de ruptura e forte tendência ao encruamento (KUO-LIANG, 1984).

A baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis é outro fator prejudicial a usinagem.

Nessas condições, o calor gerado durante o processo de deformação concentra-se nas regiões de cisalhamento, elevando muito a temperatura de corte. A Figura 2.9 mostra uma comparação entre a condutividade térmica do aço inoxidável do tipo austenítico em relação a outros aços, mostrando que a mesma se apresenta duas a três vezes menor (MATIN e OCQUIDANT, 1992).

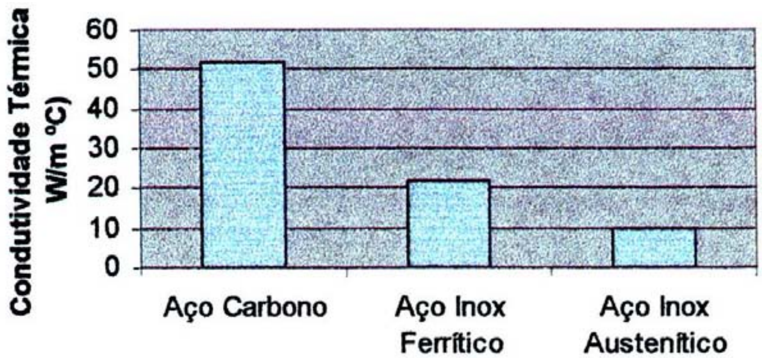


Figura 2.9 - Condutividade térmica dos aços inoxidáveis (MATIN e OCQUIDANT, 1992).

A baixa usinabilidade do aço inox do tipo austenítico, vista em várias formas de desgaste como de flanco, de cratera e de entalhe, assim como a deformação plástica e o microlascamento (fragmentos de ferramenta são arrastados com o cavaco), também são atribuídos às baixas propriedades térmicas e conseqüentes altas temperaturas alcançadas na usinagem destes materiais.

Do ponto de vista do desgaste da ferramenta, a adesão severa e a tendência à formação da aresta postiça de corte são outros fatores que contribuem para agravar os problemas de usinagem inerentes a este tipo de material.

A Tabela 2.3 mostra uma comparação entre o coeficiente de dilatação térmica, demonstrando a dificuldade que o aço inox do tipo austenítico tem em manter as tolerâncias de usinagem, principalmente em condições de refrigeração inadequada (RIOS, 1992).

Tabela 2.3 - Coeficiente de dilatação térmica entre 20 e 200 °C para famílias de aços (RIOS, 1992)

Famílias de aço	Coeficiente de dilatação térmica (μm/m °C)
Aços de construção mecânica	11
Aços inoxidáveis martensíticos (13 % Cr)	11
Aços inoxidáveis austeníticos (10 –18% Ni)	18,5

As freqüentes dificuldades na quebra do cavaco e a deterioração da qualidade superficial são atribuídas às instabilidades do fluxo associadas às altas taxas de deformação e efeitos térmicos presentes na usinagem. Como conseqüência, observa-se a formação de cavaco lamelar e flutuação nas forças de corte (CHANDRASEKARAN, JOHANSSON e GUNNARSSON, 1994).

2.4 Aço inoxidável: soluções para usinagem

A baixa usinabilidade dos inoxidáveis, principalmente os do tipo austenítico, é uma de suas principais características, e é determinada por (GENNARI e MACHADO, 1999).

- Alta deformabilidade;
- Elevadas taxas de encruamento;
- Baixa condutividade térmica;
- Elevada tensão de ruptura;
- Tendência de aderência na ferramenta e elevado coeficiente de atrito;
- Elevadas temperaturas e forças de corte;
- Prejuízo do acabamento superficial;
- Altas taxas de desgaste da ferramenta.

O emprego de adições de elementos de livre corte é o recurso mais antigo adotado para a melhoria da usinabilidade dos aços inoxidáveis, sendo o enxofre o elemento inicialmente utilizado. Entretanto a adição pura e simples mostrou-se prejudicial às propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

O controle da morfologia e da quantidade das inclusões apresenta-se como uma boa alternativa aos métodos antigos e sem resultar na perda das propriedades desejáveis. A

desoxidação com cálcio e a adição de cobre, que são formas recentes de tratamento do material, têm apresentado bons resultados quanto à melhoria da usinabilidade (TESSLER e BARBOSA, 1993).

Recomendações referentes à geometria das ferramentas sugerem o emprego de ângulos de saída positivos e grandes ângulos de folga, com a presença de quebra-cavacos sempre que possível. O material de ferramenta mais indicado é o metal duro, revestido ou não (SANDVIK, 1994).

O emprego de velocidades de corte e avanços moderados e de grandes profundidades de corte (até o valor limite) proporcionam melhores resultados, em função do material a ser trabalhado e da ferramenta utilizada.

Máquinas, estruturas e elementos de fixação devem ser robustos e estáveis, para evitar vibrações durante a usinagem, uma vez que as forças de cortes são, quase sempre bastante elevadas.

2.5 Alguns Estudos Realizados no Processo de Furação

Fang e Zang (1996) pesquisaram a formação da camada aderente durante a progressão do desgaste no torneamento do aço inoxidável austenítico de corte livre.

Muitas pesquisas têm sido feitas para estudar a influência metalúrgica de certas inclusões óxidas na usinabilidade dos aços.

Pesquisadores como Nordgrem e Melander (1989) e Helisto, Helle, Pietkainen (1990) indicaram que a formação da camada não metálica na superfície de saída da ferramenta é a principal razão para usinabilidade melhorada e indicaram também que a vida da ferramenta aumenta quando se usinam aços tratados com cálcio.

A camada aderente comparada às coberturas artificiais tem a vantagem de ser relativamente estável depois de certo comprimento de corte.

Os materiais usados no experimento foram um aço inoxidável de corte livre e um aço inoxidável comum. As suas composições são mostradas na Tabela 2.4. Com a ajuda da microscopia eletrônica, dois tipos de inclusões podem ser identificados: as inclusões compostas de formato circular (CaO, Al_2O_3, SiO_2 e MnS) e as inclusões na forma de veios de MnS.

Tabela 2.4 – Composição química do material usado no experimento, % em peso (FANG e ZANG, 1996).

Material	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Ca	Al	Fe
Aço Inoxidável de corte livre	≤ 0,08	≤ 1,50	≤ 0,08	≤ 0,10	≤ 0,04	16,50	9,50	≤ 1,00	≤ 0,25	< 0,01	-	Restante
Aço Inoxidável comum	0,041	1,53	0,85	0,004	0,017	18,20	9,43	-	0,11	-	0,042	Restante

A usinabilidade do aço inoxidável de corte livre e o aço inoxidável comum foram também estudados comparando as forças de corte, vida da ferramenta, controle de cavaco e rugosidade superficial.

2.5.1 Usinabilidade do aço inoxidável de corte livre

O desgaste da ferramenta está diretamente relacionado com a determinação da usinabilidade dos materiais.

Os experimentos da força de corte (Figura 2.10) indicam que tal força necessária para usinar o aço inoxidável de corte livre é reduzida em 25% se comparada a usinagem de aço inoxidável comum.

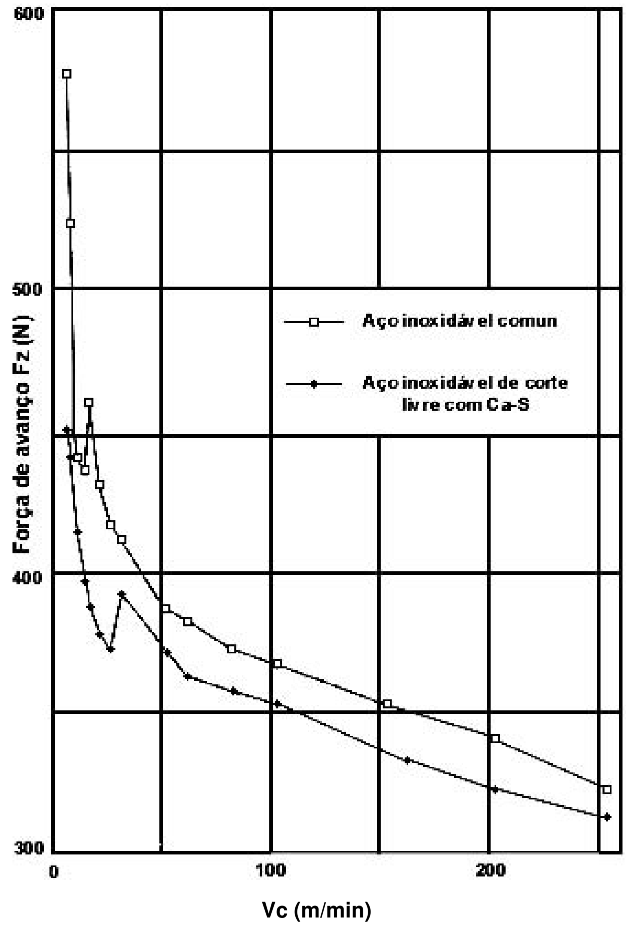


Figura 2.10 – Curva da força de corte x velocidade de corte (FANG e ZANG, 1996).

A vida da ferramenta na usinagem dos aços inoxidáveis de corte livre é bastante prolongada, como pode ser vista na Figura 2.11.

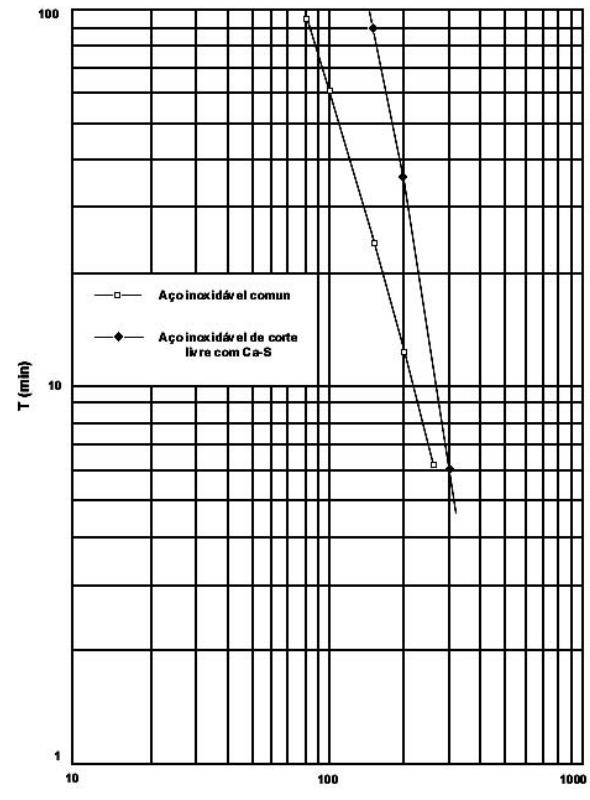


Figura 2.11 – Curva da vida da ferramenta x velocidade de corte (FANG e ZANG, 1996).

O desgaste frontal foi muito maior na usinagem do aço inox comum, enquanto que para o aço inox de corte livre, o desgaste frontal foi relativamente pequeno (Figura 2.12).

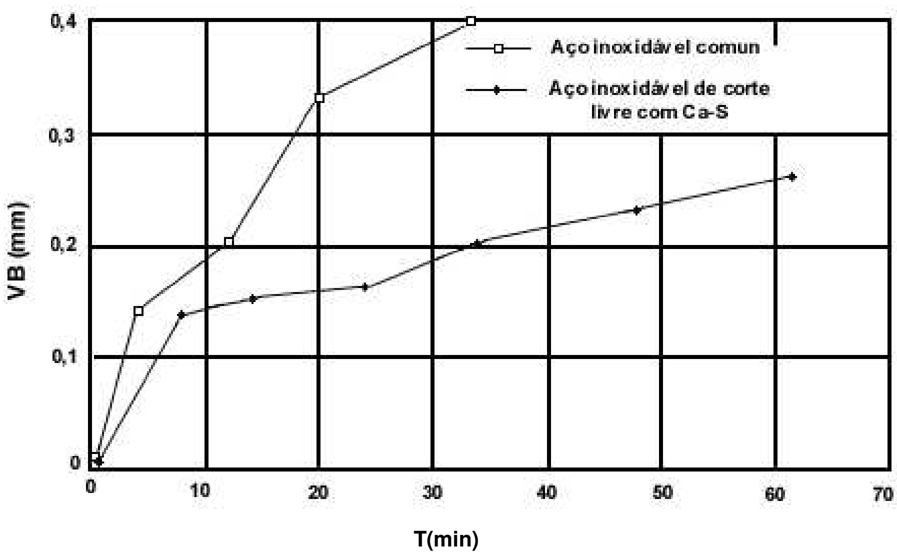


Figura 2.12 – Curva do desgaste frontal Vb (Vc=200m/min; fn= 0,195 mm/min^{-1}; ap= 1mm) (FANG e ZANG, 1996).

Os cavacos gerados na usinagem dos aços inoxidáveis de corte livre tinham basicamente a forma de "C" ou pequenos espirais, enquanto para os aços inoxidáveis comuns, os cavacos eram longos e de difícil quebra.

As razões para a melhora da usinabilidade consistem em:

a) Efeito dos sulfetos

Durante o processo de transformação, as inclusões de sulfeto de manganês (MnS) na zona de corte podem ser alongadas de uma curta faixa até uma longa faixa em uma determinada direção. Na zona de formação primária, MnS é alongado ao longo da direção do plano de cisalhamento, reduzindo a área de contato de escorregamento entre as diferentes camadas do metal. O comprimento de contato ferramenta-cavaco é também reduzido. Como uma substância de fato, o MnS pode ser considerado como uma microtrinca no aço que poderia aumentar a quebra do cavaco durante a usinagem.

b) Influência do composto óxido de cálcio

O efeito combinado do óxido de cálcio (CaO) de formato circular e a significante deformação do cavaco no plano de cisalhamento resultam em microtrinca em torno das inclusões de cálcio. A diminuição da atual área anticisalhante e o efeito das concentrações de tensões, também contribuem para a diminuição da força de corte.

Os autores Fang e Zang (1996) concluiram que:

1. A usinabilidade dos aços inoxidáveis com sulfeto de cálcio (CaS) de corte livre é melhor que o correspondente aço inoxidável comum. Uma das principais razões para a melhoria da usinabilidade é a formação da camada aderente na superfície da ferramenta durante a usinagem do aço inoxidável de corte livre.

2. Durante a progressão do desgaste da ferramenta, quando se usina o aço inoxidável de corte livre com CaS, uma camada aderente é formada na superfície de saída e de incidência da ferramenta, a qual tem um efeito protetivo sobre a ferramenta de corte, prolongando assim, a vida da ferramenta.

3. A camada aderente formada sobre a superfície de saída é basicamente constituída por compostos óxidos ternários (CaO, MgO, MnO), - Al_2O_3- SiO_2;

4. O CaO é distribuído uniformemente em toda área da camada aderente. O óxido de magnésio (MgO) e o óxido de alumínio (Al_2O_3) apresentam-se em grande densidade próximos da ponta da ferramenta. MnO e TiO_2 estão distribuídos na área onde a camada aderente termina;

5. A superfície de saída não é completamente recoberta pela camada aderente e a espessura da camada é desigual;

6. O processo de formação da camada aderente pode ser resumido como: viscoso, adesivo e endurecido e com uma espessura relativamente estável.

Chen e Liu (2000) pesquisaram a influência de várias coberturas em brocas helicoidais de aço rápido na furação dos aços inoxidáveis JIS SUS 304 (ABNT 304).

A montagem do experimento para medir a força de avanço e momento torsor é apresentado na Figura 2.13.

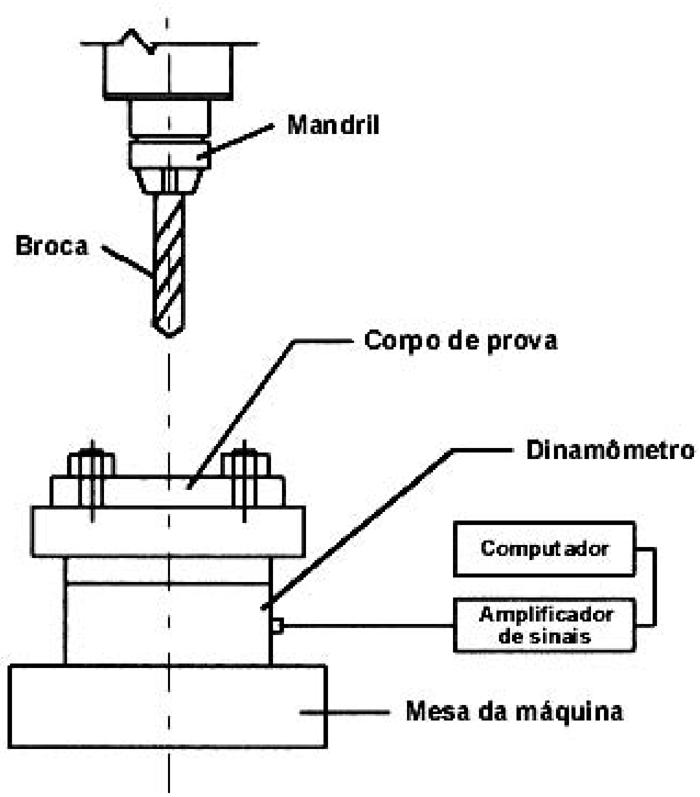


Fig. 2.13 – Montagem do experimento para medir a força de avanço e momento torsor (CHEN e LIU, 2000).

Para poder investigar o efeito das condições de furação na resposta da força de corte, a rotação foi fixada variando as taxas de avanço e, então, estas foram fixadas variando a rotação do fuso.

O material usado no ensaio foi um aço inoxidável JIS SUS 304. A composição química e as propriedades mecânicas do material usado nos estudos se encontram nas Tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5 – Composição química (% em peso) do material ensaiado (CHEN e LIU, 2000).

Elemento químico	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
% em peso	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	18-20	8-12

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas do material ensaiado (CHEN e LIU, 2000).

Alongamento (%)	42
Dureza Brinell	158 - 176
Tenacidade a fratura (mJ/m^2)	1,76
Condutividade térmica (W/mK)	16,27

As conclusões levantadas pelos autores Chen e Liu (2000) sobre o trabalho realizado foram as seguintes:

1- As brocas recobertas com multicamadas de TiN demonstraram menores médias de força de avanço e torque, enquanto que a broca recoberta com monocamada de TiN apresentou as maiores médias entre estes três tipos de coberturas das brocas helicoidais na furação dos aços inoxidáveis JIS/SUS 304 (ABNT 304).

2- A média dos valores das forças de avanço e torque aumenta com a elevação da taxa de avanço para ambas brocas helicoidais recobertas para a mesma rotação do fuso de 120 rpm. A média dos valores para a força de avanço e torque aumenta com a elevação da rotação do fuso acima de 120 rpm, mas diminui com o aumento da rotação de 120 para 157 rpm.

Porém, o efeito da taxa de avanço na força de avanço e torque gerados durante o processo de furação para ambas as brocas recobertas é maior que a da rotação do fuso.

3- A largura do desgaste desenvolvido na superfície de incidência, foi também examinada no presente experimento. A largura do desgaste frontal aumenta com o aumento de furos executados. Isto demonstra que a broca recoberta com multicamada de TiN tem a maior taxa de desgaste entre estas brocas helicoidais recobertas.

Sullivan e Cotterell (2002) pesquisaram as técnicas da detecção do encruamento nos aços inoxidáveis austeníticos.

Demandas por alta produtividade e um melhor uso das ferramentas de corte resultam em uma combinação de parâmetros de usinagem, na qual os danos na superfície e subsuperfície da peça e da ferramenta de corte não são evitados com certeza.

Uma detecção rápida da formação do encruamento sobre a superfície do material na usinagem é desejável.

Como resultado, uma técnica em tempo real foi desenvolvida para a detecção do encruamento no material da peça durante as operações de usinagem.

É amplamente aceito que o encruamento dos aços inoxidáveis ocorra devido à formação martensita. A martensita pode se formar nos aços inoxidáveis austeníticos durante a deformação plástica do trabalho mecânico ou devido aos efeitos da temperatura.

Uma investigação das técnicas de detecção do encruamento é apresentada. Algumas das especificações da indústria de manufatura moderna para esta técnica em tempo real incluem:

- O processo de detecção não deverá ser destrutivo, apesar de aumentar a velocidade e reduzir os custos de experimentação;
- Essa técnica deve ser facilmente adaptada para centros de torneamento e de usinagem;
- Isso deve indicar para o operador da máquina o início do encruamento do material.

2.6 Revisão das técnicas de detecção do encruamento em tempo real

Na engenharia de fabricação, várias técnicas são usadas para checar o estado da integridade da peça usinada, por meio do monitoramento do processo ou avaliando as condições de corte da ferramenta. No passado, uma inspeção rápida e qualitativa da integridade superficial na linha de produção não era possível. Hoje, diferenças de macro ou microgeometria na qualidade de componentes pode ser facilmente controladas por processos visuais em pós-processo, durante o processo e em processos orientados. A Figura 2.14 mostra sistemas disponíveis para muitas aplicações (SULLIVAN e COTTERELL, 2002).

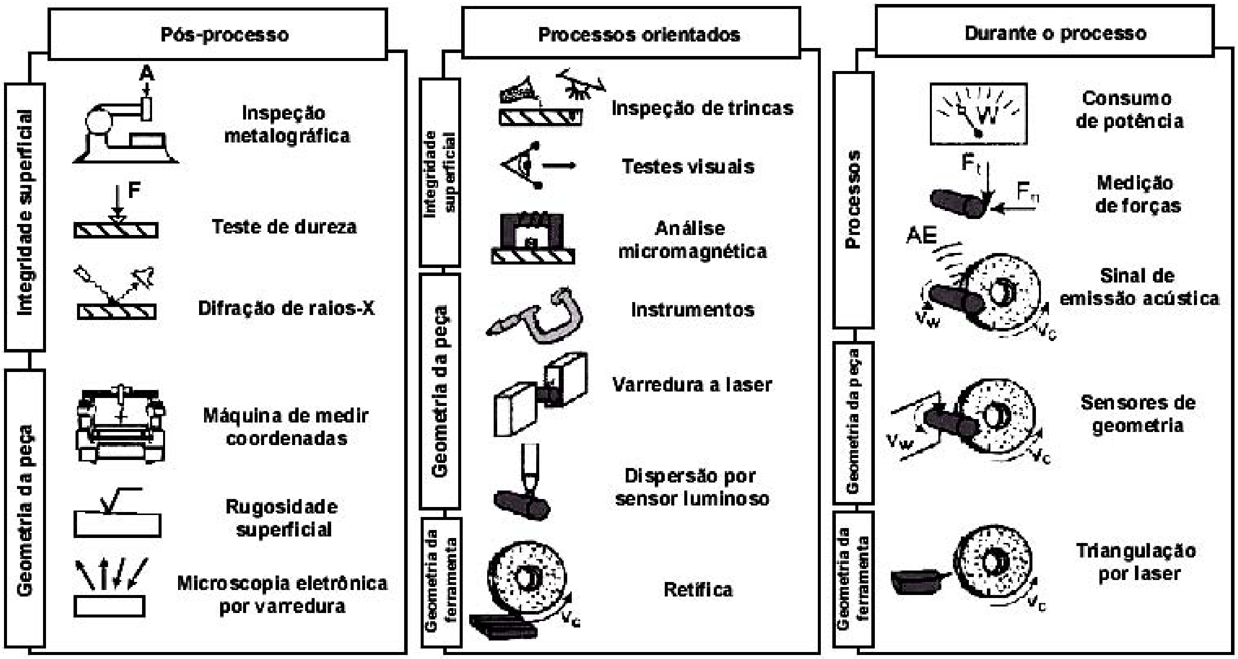


Figura 2.14 - Métodos para inspeção qualitativa (SULLIVAN e COTTERELL, 2002).

Pós-processo significa que a inspeção é somente possível depois da usinagem. No processo são descritos os sensores que podem ser usados durante a usinagem. Processos orientados significam que depois da usinagem, a geometria e a integridade superficial podem ser inspecionadas facilmente e rapidamente.

Um método de inspeção em tempo real proporciona a otimização das condições de usinagem. Os custos deste são determinados principalmente por seu tempo, o qual é necessário para medição e usinagem (Figura 2.15). Fabricação com sensoriamento durante o processo significa que um tempo adicional para a medição não é necessário. Estima-se uma redução nos custos de 20% (SULLIVAN e COTTERELL, 2002).

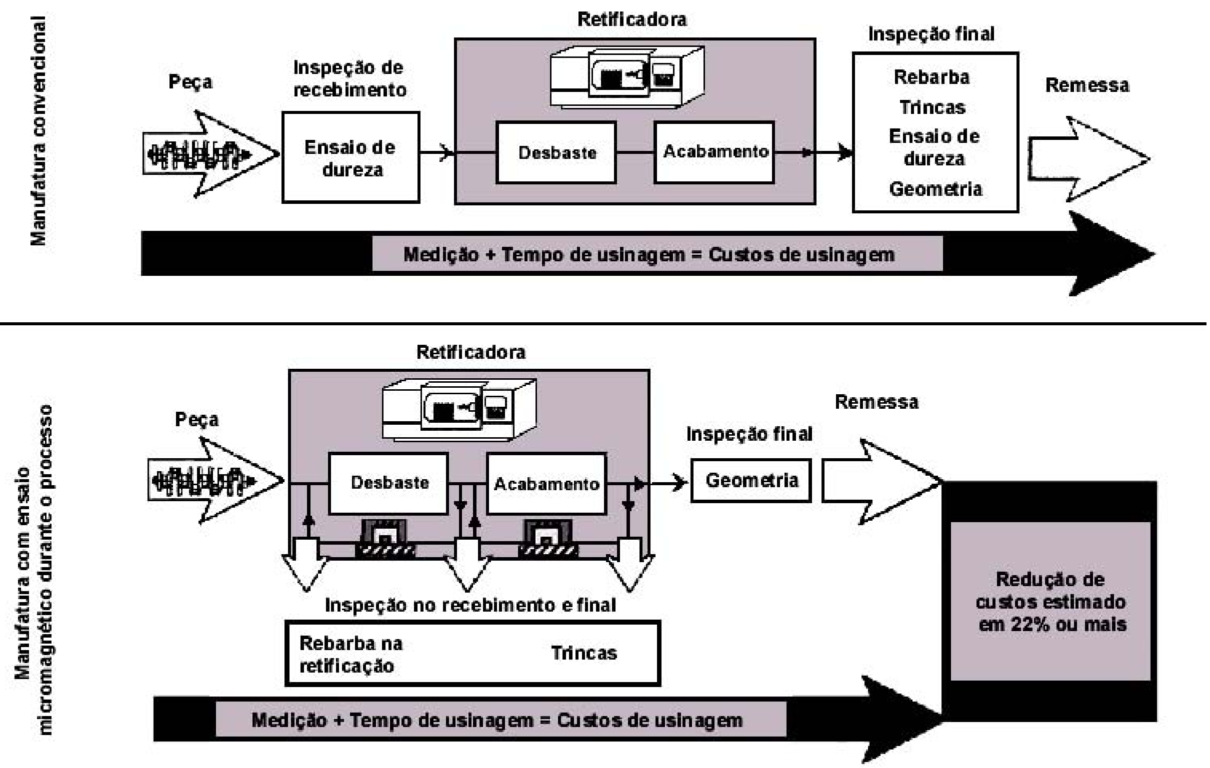


Figura 2.15 – Vantagens de usar o teste micromagnético para a medição durante o processo (SULLIVAN e COTTERELL, 2002).

Atualmente, pesquisadores estão utilizando com grande freqüência as técnicas de análise não-destrutiva em processo orientado. Sullivan e Cotterell (2002) apresentaram os princípios e os resultados dos diferentes sensores micromagnéticos, e sistemas de análise acústicos para a medição do encruamento em tempo real dos aços inoxidáveis austeníticos.

2.7 Propriedades magnéticas dos aços inoxidáveis austeníticos

Todos os aços inoxidáveis austeníticos são paramagnéticos na condição recozidos. A martensita ε é paramagnético em contraste com a martensita α´, que é fortemente magnética.

Portanto, os aços inoxidáveis austeníticos (quando encruados) têm propriedades magnéticas detectáveis que podem ser eliminadas por recozimento.

O controle de qualidade de peças usinadas em relação à tensão residual, dureza e textura é possível com sistema de análise micromagnética, tais como:

a) Teste de permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética é definida como parâmetro de medida que expressa a facilidade com que o material possa ser magnetizado. Esse valor é encontrado pela razão da indução pela força de magnetização.

O teste de permeabilidade magnética pode ser utilizado para identificar o teor de ferrita dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex. O teor de ferrita tem um efeito significante nas propriedades mecânicas e de corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos. Estes testes magnéticos não-destrutivos são precisos e podem quantificar o teor de ferrita. As sondas portáteis podem medir o teor de ferrita entre 0 e 80%.

b) Espectroscopia de Mössbauer

A espectroscopia de Mössbauer é uma técnica de medição precisa e confiável para determinar a relação ferromagnética/paramagnética das ligas.

Por definição, a espectroscopia de Mössbauer está interessada na observação de níveis de energia nuclear resultantes da emissão e absorção de raios γ.

A técnica de espectroscopia de Mössbauer é usada para determinar o volume da martensita ferromagnética nos aços inoxidáveis austeníticos deformados, isto foi usado para calibrar os resultados de energia do ruído de Barkhausen. Para esse estudo, foram realizadas as medidas em diferentes amostras, nas quais foram encontrados resultados de Mössbauer e Barkhausen satisfatórios.

c) Ataque magnético

O ataque magnético é feito com a ajuda de uma solução magnética de partículas coloidais para ver a morfologia e a distribuição da fase magnética (α' - martensita) na amostra. Isto é feito aplicando a solução magnética na superfície polida da amostra e observando-se microscopicamente.

O modelo de partículas acalmadas pode, então ser fotografado com um campo magnético em condição ligado e desligado.

Para a condição desligado as partículas acomodam-se randomicamente não sendo afetadas por nenhum campo magnético. Para a condição ligado as partículas acomodadas são atraídas para

a fase magnética presente nas amostras de aço sob influência do campo magnético. Isto habilita a observação da atração preferencial das partículas magnéticas coloidais para a fase magnética presente na superfície polida da amostra de aço inoxidável na condição ligado.

d) Ruído de Barkhausen

A análise do ruído de Barkhausen ou teste micromagnético é baseada na detecção indutiva de um sinal sonoro em materiais ferromagnéticos sujeito ao campo magnético externo.

Outros pesquisadores usaram a análise do ruído de Barkhausen para medição da quantidade de α' - martensita durante a deformação plástica dos aços inoxidáveis austeníticos.

Os efeitos do trabalho a frio e do tratamento de recozimento dos aços podem ser explorados usando ruído magnético de Barkhausen para a sua medição.

e) Sistemas de análise por emissão acústica

A emissão acústica (E.A.) pode ser definida como a propagação transiente de ondas elásticas resultantes dos micro-deslocamentos internos localizados em um sólido. Tais ondas propagam-se por meio de um sólido e produzem deslocamentos sobre esta superfície. Esses deslocamentos podem ser detectados por transdutores adaptáveis.

A técnica por emissão acústica pode ser usada para a detecção do encruamento nos aços inoxidáveis austeníticos porque tem o potencial adequado para monitorar a transformação de fase em tempo real.

A emissão acústica durante a transformação martensítica foi observada pela primeira vez em 1936 por Forster and Scheil, enquanto estudavam um aço com 29% de níquel.

A emissão acústica foi usada para caracterizar a tensão de deformação nos aços inoxidáveis AISI 304 recozido e trabalhado a frio. Várias técnicas foram empregadas para identificar e quantificar a transformação austenítica γ em martensítica α', e os resultados obtidos foram usados para confirmar os resultados da emissão acústica.

Para a detecção do encruamento, a emissão acústica foi a que apresentou melhor desempenho durante a usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. A importância da fase martensítica no encruamento poderá ser investigada e identificada por técnicas de difração. A técnica micromagnética foi usada como um comparador para os resultados da análise por emissão acústica e para quantificar a transformação de fase martensítica α'.

Dolinsek (2003) pesquisou sobre o encruamento dos aços inoxidáveis austeníticos. O objetivo do seu estudo foi o de encontrar as causas da dificuldade na usinagem dos aços inoxidáveis e particularidades no mecanismo de transformação do cavaco.

As características originárias dos aços inoxidáveis austeníticos são: alta tenacidade, baixa condutividade térmica e alto coeficiente de encruamento. Do ponto de vista da usinabilidade, a mais importante característica é o encruamento.

A fase austenítica tem uma grande tendência para deformar devido a um elevado número de planos de deslizamento, enquanto que o aumento da tensão e dureza durante a deformação resulta também na transformação metaestável da austenita.

Em conseqüência da baixa condutividade térmica dos aços austeníticos, os cavacos são formados com base na falha catastrófica em uma estreita superfície de cisalhamento. De maneira desfavorável, cavacos segmentados são formados.

Na usinagem, essas características causam: formação da aresta postiça de corte quando ferramentas de metal duro são usadas, quebra da aresta na utilização de insertos cerâmicos e queda repentina na dureza de ferramentas feitas de aço rápido.

Baixos valores de vida da ferramenta, aumento das forças de corte e o aparecimento de cavacos desfavoráveis são as principais características que classificam estes aços em meio a um grupo de materiais que são difíceis de usinar.

O processo de furação e também em outros processos de usinagem de aços inoxidáveis, são considerados tarefas difíceis, as quais diminuem a vida da ferramenta, causam deficiência no controle de cavaco e provocam alto nível de temperatura e forças de corte que ameaçam a aresta de corte levando a uma rápida quebra (SANDVIK , 1996).

Com uma alta taxa de encruamento e uma baixa condutividade térmica, os aços inoxidáveis são geralmente mais difíceis de usinar do que os outros aços ligas.

A austenita tem uma alta taxa de encruamento, o que depende de sua transformação em martensita quando o material está exposto a altas taxas de deformação.

Em muitos casos, problemas na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos estão associados à formação da aresta postiça de corte, superfícies ruins e um mau controle do cavaco.

Um estudo da formação do cavaco nesses aços evidencia que o corte realizado por ferramentas com baixo ângulo de saída é caracterizado pelas altas variações nas forças de corte.

Uma aresta de corte afiada significa ação de corte mais suave com menores forças envolvidas e menos formação de marcas na peça.

A formação da aresta postiça de corte está principalmente relacionada com a temperatura, a velocidade de corte depois da remoção, e leva a ferramenta ao lascamento. Este tipo de formação é um dos mais interessantes assuntos no estudo dos princípios do corte dos metais.

A Figura 2.16 mostra qual a distribuição da tensão no contorno da aresta postiça de corte e apresenta como o material preso atua na aresta de corte (DOLINSEK, 2003).

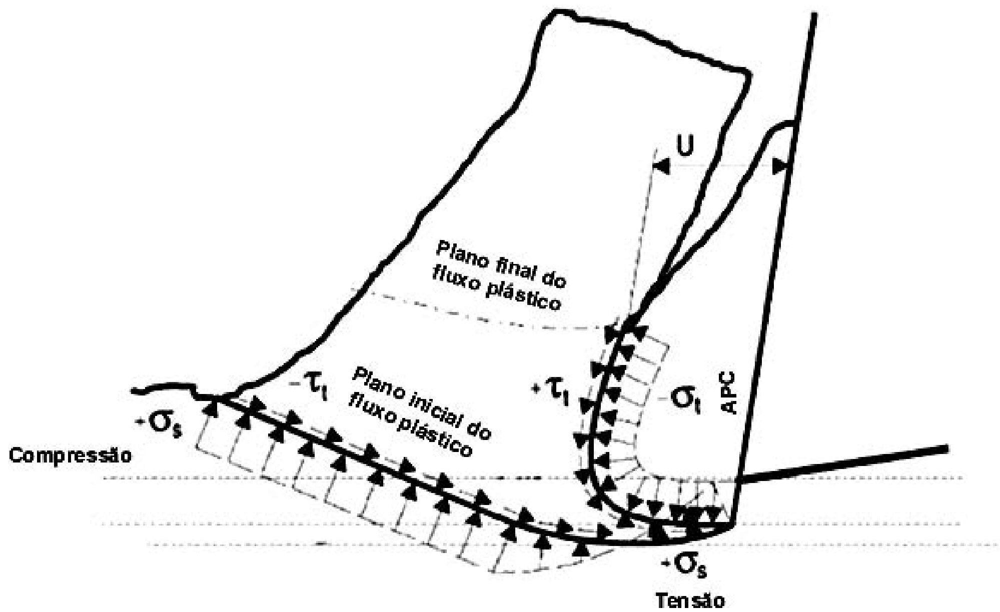


Figura 2.16 – Processo de cisalhamento e o aparecimento da APC (DOLINSEK, 2003).

O formato da geometria é mutável, ou seja, magnitude e direção da força de corte oscilam, afetando assim, a grandeza da força de corte.

As principais influências da aresta postiça de corte estão na tensão de atrito e no aumento do ângulo de saída.

A ponta da ferramenta não mais atua como uma fonte de movimento de discordâncias, onde a produção de estruturas celulares é intensiva, e o alto grau de encruamento que acontece à frente da ponta da ferramenta causa dificuldades adicionais na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos.

2.8 Encruamento do cavaco nas arestas da broca

Após vários ensaios, a maioria das peças apresentou cavacos presos a elas DOLINSEK (2003). Para a análise destes, as peças foram cortadas com o auxílio da eletroerosão. Estes cortes foram realizados de forma que se aproximasses a uma foto ortogonal do cavaco (Figura 2.17).

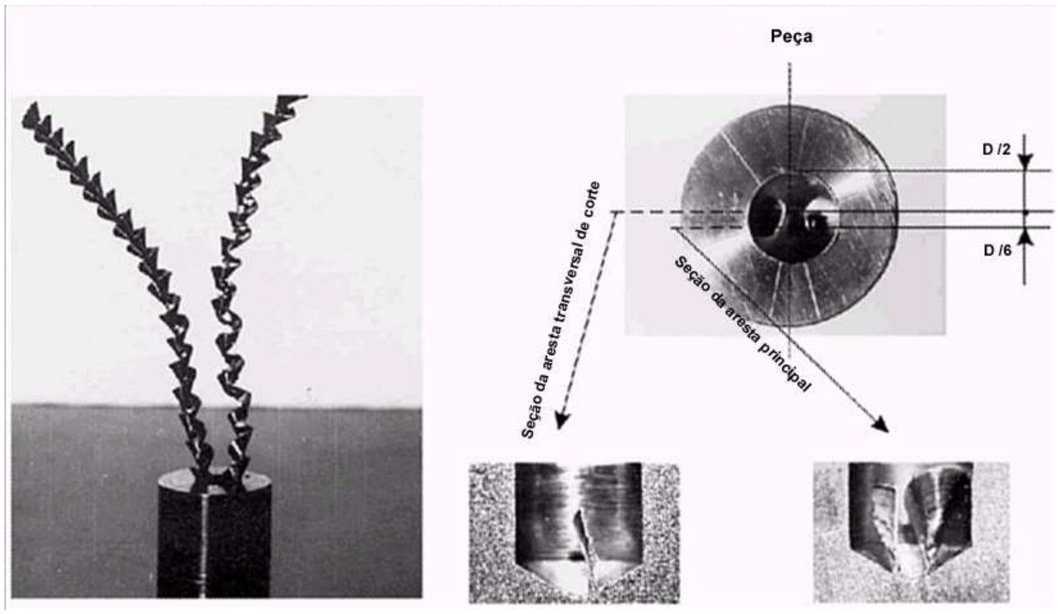


Figura 2.17 – Amostras obtidas para análise da zona de corte (DOLINSEK, 2003).

A análise parcial da formação do cavaco na aresta de corte da ferramenta foi feita com um microscópio eletrônico.

Imagens completas dos eventos na zona de corte podem ser obtidas por meio das fotos da microestrutura e medição de microdureza da peça.

A análise da região de corte permite determinar a espessura do cavaco e ângulo de cisalhamento, a microdureza e endurecimento da superfície usinada e cavaco, profundidade de endurecimento, recristalização do material, mudança estrutural do material da peça e o efeito da aresta postiça de corte na formação do cavaco.

O fato de remover um cavaco fino do centro da broca na zona de corte faz surgir uma aresta postiça de corte na aresta principal de corte.

O autor Dolinsek (2003) concluiu que o fenômeno do encruamento é a principal causa da dificuldade de furação dos aços inoxidáveis austeníticos.

As afirmações foram feitas com base na análise experimental da raiz do cavaco obtido pelo processo “quick-stop” de furação.

O modelo de corte apresentado difere do modelo de corte de aços com boa usinabilidade dado o alto grau de encruamento na região de corte, particularmente em sua aresta transversal, que contribui para a força de avanço (50%) e o momento torsor (30%), devido ao cavaco formado na aresta transversal de corte que age como uma aresta postiça nas arestas principais.

Baseando-se em tais resultados, foram estabelecidas recomendações para a seleção de parâmetros de corte para furar aços inoxidáveis austeníticos na região de mínimo grau de encruamento.

Akasawa, *et al*. (2003), conduziram um experimento para determinar os efeitos dos elementos de liga de corte livre na usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos no processo de torneamento.

Os materiais usados no experimento foram os aços SUS 303, SUS 303Cu, SUS 304 e SUS 316, contendo os elementos de liga S, Ca, Cu, Bi usando forno comercial e forno de indução a vácuo para a fusão desses aços.

Muitas tentativas têm sido feitas para melhorar a usinabilidade desses aços, adicionando-se elementos de liga tais como, enxofre, selênio e telúrio.

Em recentes considerações ambientais, a indústria vem sendo forçada a reduzir a quantidade de elementos, tais como o chumbo, selênio e telúrio nesses aços, pois pode causar danos a saúde.

Após os ensaios realizados, os autores Akasawa, *et al*. (2003) apresentam os seguintes resultados e discussão:

Os efeitos dos elementos de corte livre na rugosidade superficial dependeram dos elementos quando usinados sem refrigeração. A rugosidade dos aços inoxidáveis austeníticos ressulfurados foi notavelmente maior que a dos aços inoxidáveis não ressulfurados.

O aço inoxidável 303 com cálcio apresentou uma melhoria na usinabilidade. A rugosidade deste aço, com a adição de cobre e com o aumento da velocidade de corte, diminuiu para um nível aproximadamente igual ao da rugosidade do aço 303 e 304 com adição de bismuto. O bismuto, bem como o cálcio nos aços não ressulfurados, não aumenta a rugosidade.

Quando se usina os aços 304 e 304 com adição de bismuto, cavacos ocasionalmente colidem com a superfície usinada riscando-a. Quando os aços são usinados com fluído de corte, a rugosidade melhora consideravelmente. A Figura 2.18 mostra o efeito da velocidade de corte e os elementos de corte livre na rugosidade quando os aços são usinados com e sem refrigeração.

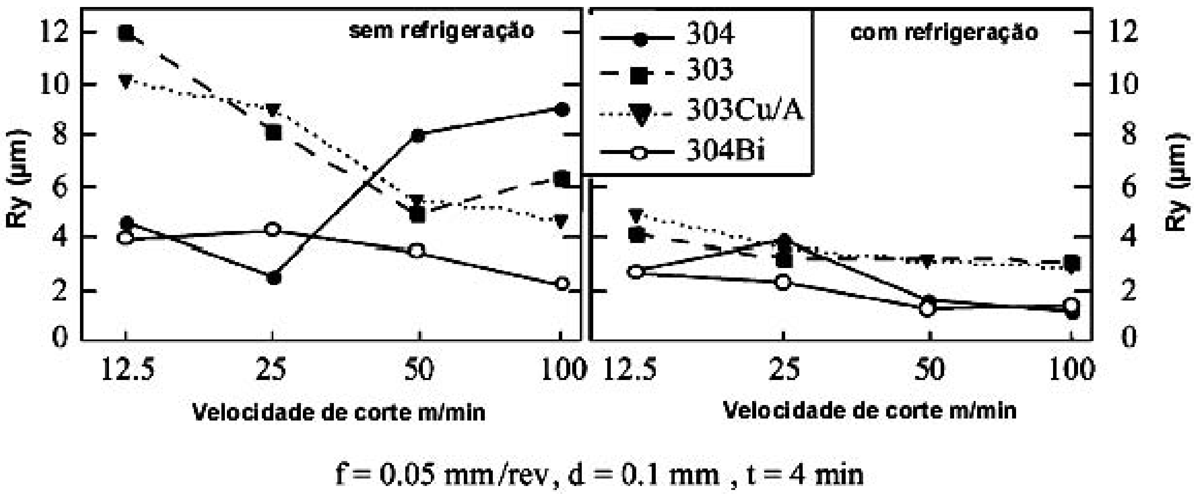


Figura 2.18 – Rugosidade superficial (AKASAWA, *et al*., 2003).

A rugosidade do aço inoxidável com adição de bismuto foi praticamente igual ao 304.

Em contraste, para o corte sem refrigeração, o nível de rugosidade do aço inoxidável 303 Cu/A, o aço ressulfurado com adição de Cu, não alcançou os níveis de rugosidade do 304 e 304 Bi, mesmo em velocidades de corte mais altas.

Quando se usinam aços ressulfurados, a aresta postiça de corte pode ser observada sob superfície do cavaco em todas as velocidades de corte (Figura 2.19).

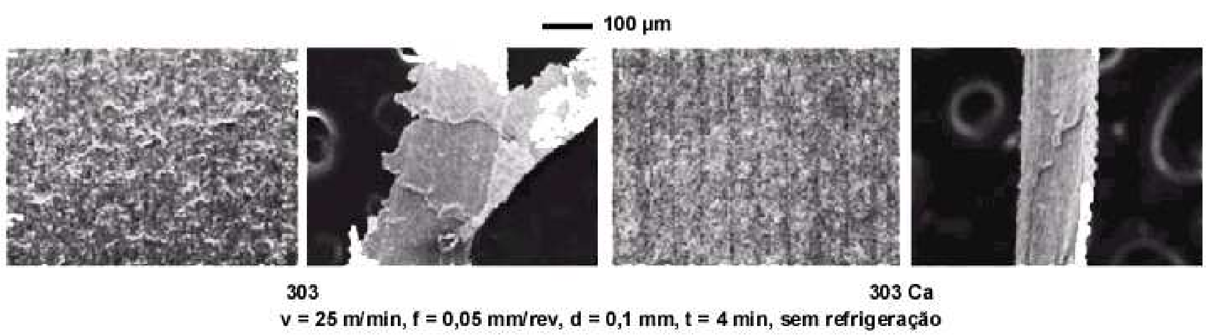


Figura 2.19 – Superfícies usinadas e superfície do cavaco (AKASAWA, *et al*., 2003).

Na usinagem de aços ressulfurados com adição de cálcio 303Ca, pequenas arestas postiças foram formadas sobre o cavaco, porém a rugosidade foi melhor nos aços sem a adição de cálcio.

Vários materiais foram encontrados aderidos na ferramenta quando se torneavam os aços de corte livre em todas as condições de corte, ainda que o tempo de corte fosse curto.

A análise dos materiais usando microscopia eletrônica por varredura mostrou que os elementos de corte livre, S, Bi, Ca e Cu, estavam presentes.

Embora os elementos de corte livre diminuíssem as forças de corte nos aços inoxidáveis na usinagem sem refrigeração, o grau desta diminuição depende do elemento e da velocidade de corte.

O teor de bismuto a 0,13% diminui a força de avanço, mas a adição de 0,3% de enxofre ou uma combinação de 0,32% de enxofre e 2,62% de cobre foram mais efetivas na redução desta força. O tratamento com cálcio como a ressulfuração e adição de cobre, diminuiu também a força de avanço.

No entanto, quando a velocidade de corte foi maior que 50 m/min, as forças de corte dos aços 304 e 304Bi foram reduzidas consideravelmente e tornaram-se praticamente igual ao aço inoxidável 303.

O efeito do tratamento com cálcio na diminuição das forças de corte foi também mínimo, quando as velocidades de corte ultrapassaram a 25 m/min.

Quando a usinagem foi executada com fluído de corte, as forças de corte dos aços inoxidáveis 304 e 304Bi foram baixas mesmo para baixas velocidades de corte, como mostra a Figura 2.20. Porém, as forças de corte para os aços inoxidáveis ressulfurados e tratados com cálcio foram menores que para os aços inoxidáveis 304 e 304Bi.

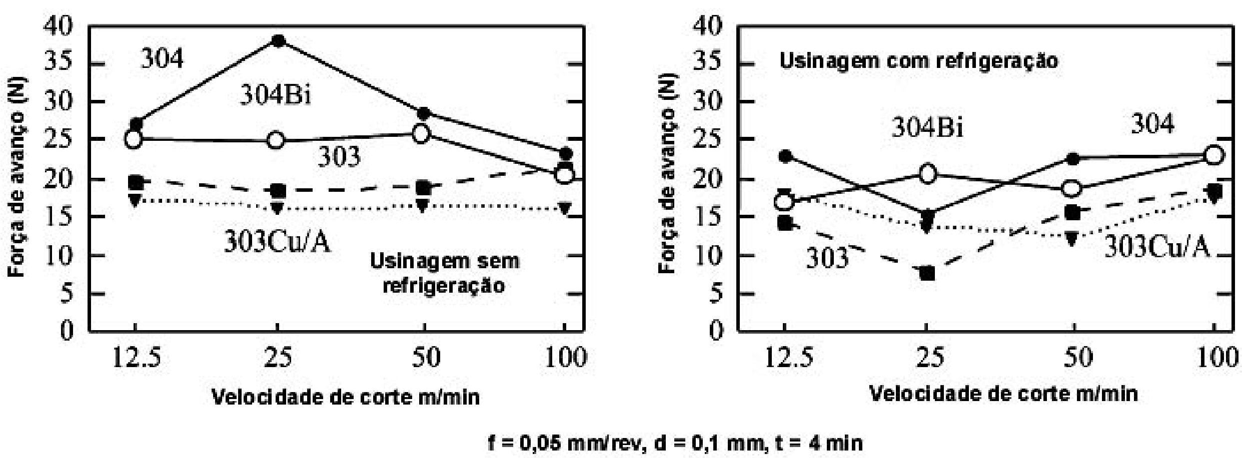


Figura 2.20 – Efeito do fluído de corte na usinagem (AKASAWA, *et al*., 2003).

AKASAWA, *et al*. (2003) concluiram que:

1. A ressulfuração deteriorou a textura superficial, especialmente em baixas velocidades de corte na usinagem sem refrigeração;
2. A ressulfuração e a adição de cobre diminuíram a força de corte;
3. A adição de bismuto melhorou o acabamento superficial, mas o efeito desta adição no desgaste da ferramenta deve ainda ser avaliado por um longo período de testes;
4. Aços inoxidáveis tratados com cálcio com inclusões de anorthite demonstraram melhor acabamento superficial e forças de corte mais baixas que os outros aços inoxidáveis austeníticos.

Capítulo 3

Máquinas, Equipamentos, Materiais e Planejamento Experimental.

Neste capítulo estão descritos máquinas, equipamentos, materiais, planejamento experimental e a metodologia de aquisição e armazenamento de dados que serviram de base para a realização deste trabalho. As análises dos dados coletados possibilitaram uma comparação técnica do desempenho da usinagem de dois aços inoxidáveis. Estes dois aços possuem propriedades mecânicas e aplicações praticamente idênticas diferindo apenas na composição química. Um aço atende as normas ABNT e o outro difere apenas por conter elementos não indicados na norma. O processo de usinagem escolhido para avaliar comparativamente os dois aços foi à furação. A utilização de fluido lubri-refrigerante aplicado externamente foi adotada uma vez que as brocas não possuíam canais internos para passagem do fluido.

3.1 Máquina Ferramenta.

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem vertical do fabricante de máquinas ROMI, modelo POLARIS V400, equipado com comando numérico produzido pela FANUC na versão 0M, conforme mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Máquina ferramenta utilizada em todos os ensaios de usinagem.

Uma das características dessa máquina ferramenta é a sua extrema rigidez que lhe confere grande estabilidade durante a usinagem, mesmo nas condições mais severas de desbaste. A potência do motor principal é de 20 CV e os três eixos são acionados por servo-motores do tipo "*brushless*". A velocidade de avanço máxima programável é de 6000 mm/min e os cursos dos eixos x, y e z são respectivamente 700 mm, 425 mm e 600 mm. Finalmente, este equipamento permite a variação contínua da rotação do eixo árvore até o limite de 6000 rpm.

O dinamômetro utilizado para medição da força de avanço e momento torsor é de procedência Suíça da marca Kistler, modelo 9272A, o qual foi acoplado ao amplificador de carga multicanal modelo Kistler 5019A. Uma placa de aquisição de sinais da *National Instruments,* modelo PCI-MIO-16E-4, foi utilizada para receber os sinais provenientes do amplificador de carga. O software *Labview* versão 6.0 permitia controlar todo o processo de aquisição de dados viabilizando, durante o tempo de aquisição de 30 segundos, capturar os dados a uma taxa de amostragem de 5 kHz e armazenar estas informações em disco. Este tempo de aquisição foi suficientemente rápido para capturar os sinais do amplificador desde o início da furação até o final. Assim, os dados amostrados permitiram acompanhar o crescimento da força de avanço e do momento torsor desde alguns segundos antes do toque da ponta da broca que evoluía em direção a superfície do corpo-de-prova, até alguns segundos após a conclusão do movimento de retração da broca.

O corpo-de-prova foi fixado no centro do dinamômetro por um dispositivo que garantia, por meio de parafusos, repetibilidade no posicionamento e uma fixação rígida do corpo-de-prova. A fixação, como mostra a Figura 3.2, foi concebida de maneira que a rigidez do sistema não sofresse alterações durante a realização dos ensaios. Todo o sistema estava acondicionado no centro da mesa do centro de usinagem.

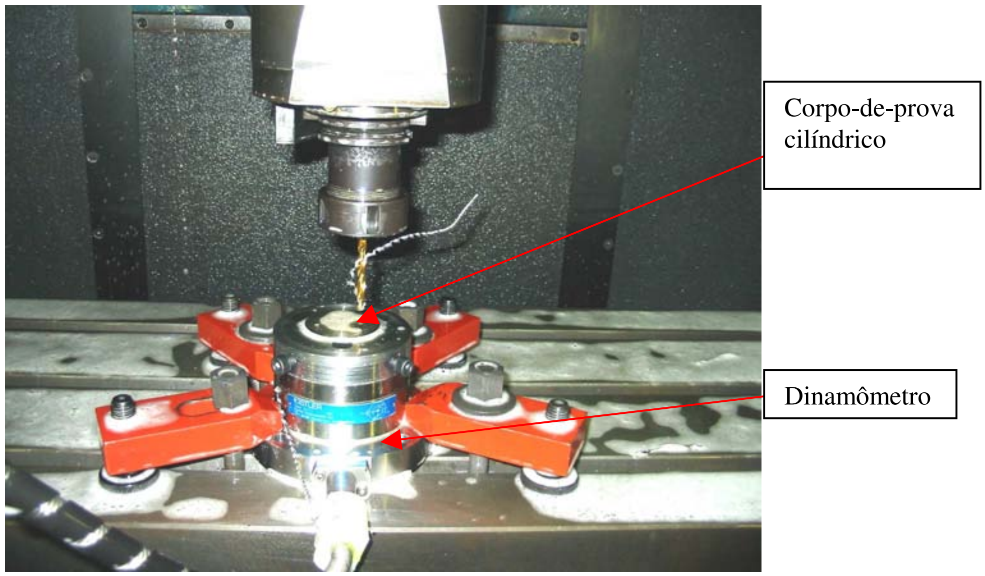


Figura 3.2 - Sistema de fixação dos corpos-de-prova.

3.2 - Equipamentos

3.2.1 - Sistema de aquisição de dados de potência

O centro de usinagem POLARIS V400 estava equipado com medidor analógico que disponibiliza dados de potência elétrica do eixo-árvore dentro de uma faixa de atuação de 0 a 10 V, tendo como fundo de escala um fator de sobrecarga de 80%. A máquina CNC não possuía recurso de digitalização ou de transmissão desses dados para um computador.

Com o intuito de avaliar a sensibilidade desse sistema analógico para monitorar o desgaste das brocas de pequeno diâmetro, foi projetado, montado e instalado dentro do CNC, um CLP baseado no microcontrolador PIC. A Figura 3.3 mostra a posição de instalação da caixa eletrônica microprocessada. Uma das oito portas disponíveis do microcontrolador PIC foi utilizada para digitalizar o sinal analógico do medidor de potência elétrica do eixo-árvore. Como o sistema era de 10 bits, a resolução de leitura da potência elétrica foi de 0,7%. O sistema digital

desenvolvido capturava dados da potência elétrica consumida pelo motor principal da máquina. Esta potência, que era afetada pelo rendimento do sistema mecânico, foi também afetada pela potência consumida na furação. A comunicação do CLP com um microcomputador dava-se por intermédio da interface paralela. Um software elaborado em Visual Basic estabelecia a comunicação com o CLP permitindo definir os parâmetros de captura do sinal e o armazenamento em disco no formato de planilha de dados.



Figura 3.3 - Sistema digital de coleta de potência instalado no CNC.

3.2.2 - Sistema para Medição dos Desgastes

O sistema de medição de desgastes foi constituído por um software livre e gratuito de manipulação de imagem, GIMP Versão 2.2.1. instalado em um microcomputador, acoplado a um microscópio estéreo com capacidade de ampliação de até 100 vezes e uma câmera digital modelo Power Shot A40 da marca Canon. Este sistema, mostrado na Figura 3.4, foi utilizado para a geração de imagens das arestas da ferramenta. As imagens capturadas foram analisadas e salvas utilizando-se o software GIMP devidamente calibrado, onde tornava possível a medição do desgaste da broca com precisão de 0,004 mm por pixel.

Com a finalidade de garantir a precisão nas medidas dos desgastes em todas as brocas ensaiadas, foram capturadas imagens nas duas superfícies de saída, referenciadas por meio de

duas impressões de microdureza em cada superfície, distantes entre si de 1 mm e eqüidistantes de 0,3 mm da aresta principal de corte. Desta forma, a todo instante, foi possível verificar a calibração do sistema e garantir que mesmo um pequeno lascamento ou um desgaste acelerado da aresta de corte não interfeririam na medição do desgaste V_B.

A captura de imagens tinha por finalidade registrar a evolução dos desgastes/avarias sofridos pelas ferramentas durante o ensaio, bem como registrar as imagens das ferramentas quando o fim de vida era atingido.

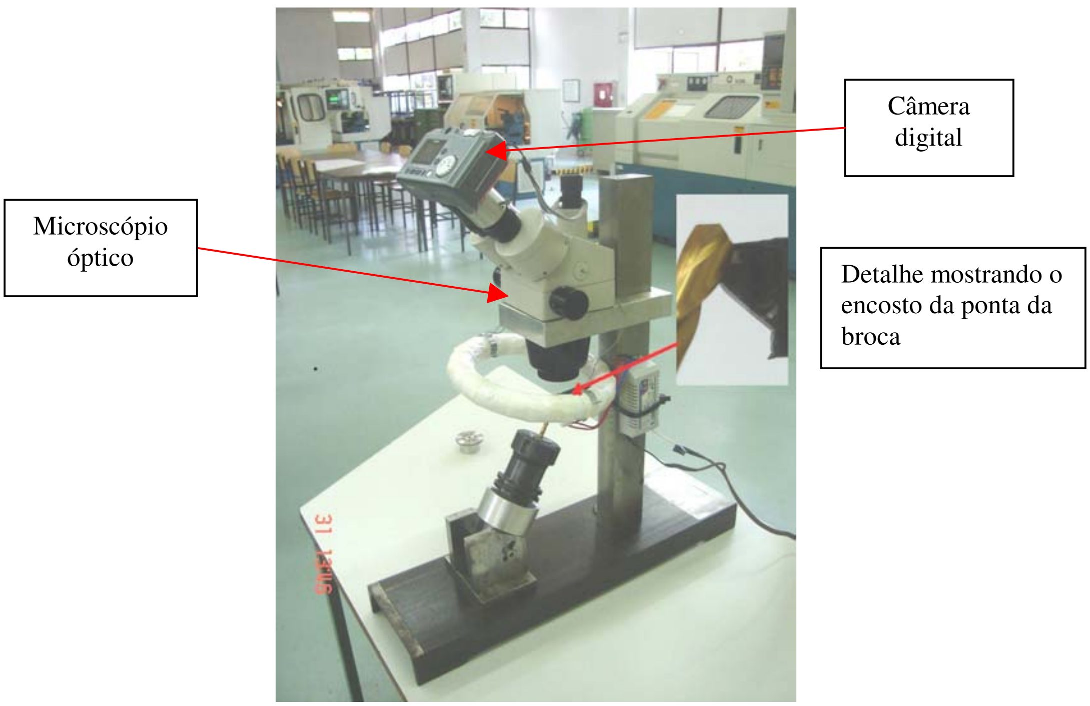


Figura 3.4 – Aparato para determinação do desgaste V_B.

3.2.3 Microscópio Eletrônico de Varredura

Para investigar a aresta da ferramenta com uma melhor definição e identificar os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta, bem como efetuar uma microanálise química de materiais que poderiam estar aderidos na ferramenta e a morfologia e composição das inclusões nos dois materiais testados, foi usado o microscópio eletrônico de varredura da Villares Metals S/A. A Figura 3.5 mostra o microscópio eletrônico utilizado da marca JEOL, modelo Superprobe 733, com sistema de microanálise por EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectrometer) e WDS

(Wavelength-Dispersive Spectrometer). Este aparelho é também conhecido simplesmente por microssonda eletrônica.



Figura 3.5 – Microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo Superprobe 733. Empresa Villares Metals S/A.

3.2.4 Microdurômetro Vickers

Foi utilizado um microdurômetro da marca ZWICK, modelo 3212 da empresa Villares Metals S/A, para avaliar a microdureza Vickers de ambos os cavacos obtidos da usinagem dos aços ABNT 304 e V304 UF, conforme mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Microdurômetro Vickers da marca ZWICK. Empresa Villares Metals S/A.

3.3 Materiais

3.3.1 Materiais Ensaiados

Os materiais utilizados nos ensaios foram os aços inoxidáveis austeníticos de baixo teor de carbono, ligados ao cromo-níquel, fornecidos pela Villares Metals S/A. O primeiro aço, codificado como V 304 é caracterizado e comercializado como aço que atende aos requisitos da norma ABNT 304. O segundo aço, codificado como V304 UF excede as especificações da norma ABNT no que se refere ao controle morfológico das inclusões e pelo controle de inclusões duras do tipo alumina.

Para atender esses novos requisitos da ABNT foram necessários, por parte do fabricante, efetuar alterações no balanceamento químico e realizar diferente forma de refino do aço. Algumas alterações estavam dentro dos limites toleráveis pela norma ABNT, por exemplo, envolvendo elementos como o enxofre. Porém, a modificação do processo de refino promoveu a adição de elementos residuais não indicados na norma, como o cálcio, por exemplo, que foi detectado na análise química. As composições químicas dos dois aços e a composição indicada pela norma podem ser observadas na Tabela 3.1. A dureza dos dois materiais ensaiados foi de aproximadamente 184 HR_B .

A Tabela 3.2 apresenta a equivalência dos aços ABNT 304 a V 304UF com as normas internacionais.

Tabela 3.1 – Análise química dos aços utilizados nos ensaios (% em massa).

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	P	S	N	Ca
V 304	0,027	0,29	1,80	18,30	8,75	0,46	0,007	0,42	0,034	0,003	0,049	0,0011
V304 UF	0,058	0,38	1,90	18,30	8,57	0,42	< 0,005	0,46	0,031	0,026	0,037	0,0036
ABNT 304	< 0,08	< 1,00	< 2,00	18,00-20,00	8,00 - 10,50	-	-	-	< 0,045	< 0,030	< 0,10	-

Tabela 3.2 – Equivalência com aço ABNT NBR 5601 304 com normas internacionais.

W. Nr.	AISI	SAE	DIN	AFNOR	UNS	BS 970	JIS G 4303
1.4301	304	30304	X5CrNi18 9	Z7CN18-09	S30400	304S15	SUS 304

3.3.2 Os corpos-de-prova

Para os ensaios de força foram preparados corpos de prova conforme desenho mostrado na Figura 3.7. A finalidade da aba de 4 mm de espessura era evitar qualquer deslocamento axial do corpo-de-prova durante a furação. A opção por corpos de prova de forma cilíndrica foi em função da necessidade de limitar que todos os furos executados estivessem dentro de um raio de 20 mm a partir do centro do dinamômetro. A disposição de um furo central e nove furos igualmente espaçados no diâmetro de 34 mm, mostrado na Figura 3.8, foi escolhida pela simplicidade de programação. Desta forma, evitou-se a necessidade de inserir fatores de correção na leitura da força de avanço e no momento torsor. Além disso, a forma cilíndrica facilita a centralização do corpo-de-prova com o centro do dinamômetro. A fixação ao dinamômetro foi por meio de dois parafusos M10 dispostos a 120° que atuavam no diâmetro de 42 mm do corpo-de-prova.

Os ensaios de vida foram feitos em placas planas, mostrados na Figura 3.9, previamente faceadas para garantir perpendicularidade entre a face e o eixo da broca.

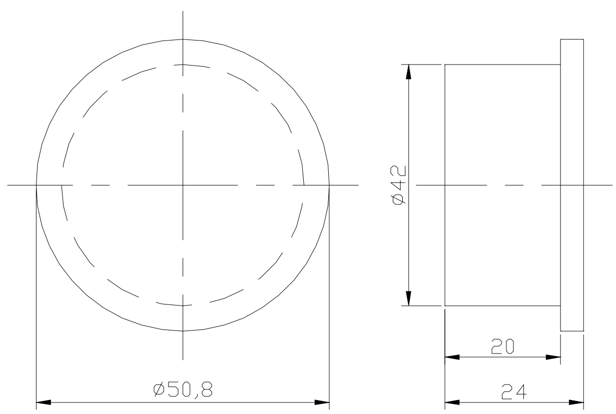


Figura 3.7 - Detalhe construtivo do corpo-de-prova.



Figura 3.8 - Corpo-de-prova cilíndrico após a furação.



Figura 3.9 - Vista frontal e lateral esquerda do perfil de teste plano.

3.3.3 A ferramenta

Para os ensaios, foram escolhidas brocas helicoidais de haste cilíndrica de aço rápido com diâmetro de 6 mm, conforme norma DIN 338, ângulo de ponta de 118°. As brocas tinham revestimento de TiN com espessura de camada de 0,002 mm. O sistema de fixação da broca no porta ferramenta foi por pinça mecânica ISO ER 40.

3.4 Fluido de corte e aparelho de medição para o controle do fluído de corte

Utilizou-se o fluido de corte FALCÃO 3000, fornecido pela empresa ADLEER Lubrificantes Ltda. Este fluido é composto de ésteres vegetais, emulgadores sem compostos fenólicos, anticorrosivos sem boro e aminas secundárias, bactericidas sem triazina. Os ésteres que o compõem são na sua maioria de cadeias longas que lhe permitem ter baixo índice de oxidação e boa estabilidade térmica. Diariamente, durante a realização dos ensaios, foi utilizado um refratômetro aferido com água destilada para controlar em 5 % a concentração do fluido. A Tabela 3.3 mostra as propriedades físico-químicas deste fluido de corte.

Tabela 3.3 – Propriedades físico-químicas do fluido de corte.

Aspecto	Líquido Límpido
Densidade (kg/dm3)	0,900 – 1,200
pH emulsão – 5%	9,5
% óleo mineral	0
Concentração de uso	Tornos → 5% Centros de Usinagem → 5% Retificadoras → 3%
Corrosão em ferro fundido (2,5%)	Passa
Tipo de emulsão	Micro emulsão

A vazão do fluido de corte foi de 60 l/min e atingia a ponta da broca por intermédio de oito bocais igualmente espaçados ao longo de uma circunferência centrada com a extremidade do eixo árvore.

3.5 - O delineamento dos ensaios

Com o objetivo de estudar a influência de uma diferente forma de refino do aço inoxidável nos esforços de corte, nos mecanismos de desgastes e na vida das ferramentas, os ensaios foram divididos em dois grandes blocos.

No primeiro conjunto de ensaios, as variáveis de influência estudadas foram divididas em: 2 níveis, ou seja, o aço ABNT 304 e o V304 UF; a velocidade de corte em 5 níveis (em valores múltiplos de 5 m/min até o limite de 25 m/min); o avanço por rotação em 2 níveis com valores de 0,06 e 0.10 mm/rev. As variáveis de influência e os seus níveis estão mostrados na Tabela 3.4. As variáveis de resposta foram à força de avanço e o torque. Estes ensaios foram realizados com a montagem da ferramenta utilizando um balanço de 56 mm.

Tabela 3.4 - Variáveis de influência dos ensaios do 1º Bloco.

Ensaio	Tipo de aço	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por rotação (mm/rpm)
1	ABNT 304	5	0,06
2	ABNT 304	5	0,10
3	ABNT 304	10	0,06
4	ABNT 304	10	0,10
5	ABNT 304	15	0,06
6	ABNT 304	15	0,10
7	ABNT 304	20	0,06
8	ABNT 304	20	0,10
9	ABNT 304	25	0,06
10	ABNT 304	25	0,10
11	V304 UF	5	0,06
12	V304 UF	5	0,10
13	V304 UF	10	0,06
14	V304 UF	10	0,10
15	V304 UF	15	0,06
16	V304 UF	15	0,10
17	V304 UF	20	0,06
18	V304 UF	20	0,10
19	V304 UF	25	0,06
20	V304 UF	25	0,10

Os programas de usinagem gerados para fazer os ensaios foram devidamente classificados pela ordem parcialmente aleatória de realização dos ensaios. Para cada experiência de material, foram selecionadas duas velocidades de corte e dois avanços por rotação, totalizando dez ensaios de furação com diferentes parâmetros de usinagem. O comprimento usinado em cada ensaio de aquisição da força não ultrapassou 6 mm para evitar a influência do desgaste da aresta de corte. Face ao diâmetro da broca escolhido, à geometria do corpo-de-prova para aquisição da força que comporta dez furos, e à curta duração do ensaio de medição da força, o número de réplicas foi igual a dez. Isto significa que foram construídos dez corpos-de-prova do aço ABNT 304 e dez corpos-de-prova do aço V304 UF.

Por uma questão de facilidade operacional a aleatorização dos ensaios foi parcial. Esta foi plena para os dez parâmetros de usinagem de realização dos furos e também para os materiais do

corpo-de-prova que foram colocados no dinamômetro. A restrição da aleatorização ocorreu em função da necessidade de se realizar os dez furos antes de se trocar o corpo-de-prova. Os furos foram feitos em grupos de dez em um mesmo material, isto é, os dez diferentes parâmetros de usinagem para realizar o furo foram utilizados em um mesmo corpo-de-prova. A troca dos materiais no dinamômetro foi aleatória bem como os parâmetros de usinagem para cada furo. Durante a realização dos ensaios, a medição da força na aresta da ferramenta de corte foi continuamente avaliada para minimizar a influência do desgaste da ferramenta. A ferramenta de corte foi substituída 3 vezes durante o ensaio.

O segundo bloco de ensaios foi realizado para analisar a influência do tipo de refino do aço inox ABNT 304 e V304 UF na vida e no mecanismo de desgaste que ocorre na ferramenta de corte. Assim, as influências das variáveis selecionadas foram o tipo de aço em dois níveis e a velocidade de corte em cinco níveis. O avanço por volta foi mantido constante em 0,09 mm/rev. A utilização de cinco níveis da velocidade de corte permitiu identificar na faixa de velocidades apropriadas para o par ferramenta-peça, os mecanismos de desgaste que estavam presentes. Com este número de ensaios, também foi possível comparar as curvas de vida para esses dois materiais. Para cada ferramenta, após ensaio de vida da ferramenta, foi enviado ao MEV para execução de uma microanálise química dos componentes aderidos.

A escolha dos parâmetros de usinagem para a realização do ensaio de vida levou em consideração os dados de catálogos de todos os fabricantes de brocas de aço rápido revestido com TiN para furação de aço inox. Os parâmetros atualmente praticados pelas empresas, utilizam destes aços inoxidáveis e ferramentas de aço rápido revestido com TiN como dados encontrados na literatura. Assim, o ensaio de vida do bloco 1 foi realizado com cinco velocidades de corte, variando entre 12,5 m/min a 17,5 m/min para o aço inox ABNT 304 e cinco velocidades de corte, variando entre 17,5 m/min a 33 m/min para o aço inox ABNT 304 UF. O valor do balanço da ferramenta foi o mesmo usado no bloco anterior.

A diferença dos níveis de velocidade de corte para os dois materiais para a realização dos ensaios de vida se deu devido ao fato da velocidade de corte para o aço ABNT 304 contida no catálogo do fabricante ser de 10 m/min. Decidiu-se então fazer com 12,5 m/min e depois com 17,5 m/min. Como o aço V304 UF já tem a denominação de usinagem facilitada, optou-se por

começar a usinagem deste com a máxima velocidade de corte utilizada na furação do aço ABNT 304.

Durante a realização dos ensaios de vida, a cada determinado número de furos que variava em função da velocidade de corte, retirava-se o conjunto ferramenta + porta ferramentas para avaliação do desgaste no microscópio. Para cada velocidade de corte ensaiada, cavacos foram recolhidos para posterior análise. Os detalhes de cada condição de ensaio podem ser vistos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Condições de usinagem dos ensaios do 2º bloco.

Ensaio de vida		
Ensaio	Tipo de aço	Velocidade de corte (m/min)
1	ABNT 304	12,5
2	ABNT 304	13,6
3	ABNT 304	14,8
4	ABNT 304	16,1
5	ABNT 304	17,5
6	V304 UF	17,5
7	V304 UF	20,5
8	V304 UF	24,0
9	V304 UF	28,2
10	V304 UF	33,0

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados e a discussão obtida para os dois blocos de ensaios.

4.1 Comentários sobre as análises executadas

O objetivo principal do primeiro bloco de ensaios foi verificar se a diferença da composição química e o controle da morfologia das inclusões duras do aço ABNT 304 UF poderia provocar alguma alteração na força de avanço e no momento torsor no processo de furação.

Para cada condição de ensaio, os dados da força de avanço e do momento torsor capturados pelo dinamômetro foram armazenados em arquivo por meio do software Labview. Dado o número de variáveis de influência do primeiro bloco (avanço por volta, rotação e tipo de material), o número de níveis para cada variável foram respectivamente 2, 5 e 2 e o número de réplicas (10) totalizando 200 arquivos a serem analisados.

Os arquivos adquiridos continham duas colunas de dados sendo uma para a força de avanço e outra para o momento torsor.

Cada coluna continha exatamente 15.000 pontos, resultantes da aquisição realizada a uma freqüência de 500 Hz por um tempo de amostragem de 30 segundos. Apesar de parecer pequeno,

o tempo de aquisição permitia amostrar um comprimento mínimo de 2,6 vezes maior que o comprimento furado, mesmo na menor velocidade de avanço.

A utilização desse tempo é justificada também pelo fato do sistema não possuir um disparador que iniciaria a aquisição da força e do momento quando a broca tocasse a superfície do corpo-de-prova.

Foram feitos também ensaios preliminares com uma ferramenta de teste para efetuar a regulagem das constantes do dinamômetro e a resolução do amplificador em função da força a ser medida.

A maioria dos resultados analisados está resumida numa representação gráfica dos dados estatísticos também conhecida por "*boxplot*" que permite representar graficamente como estão distribuídos os dados.

A dispersão dos dados é representada pela altura do retângulo. A altura corresponde à dispersão dos dados entre o primeiro quartil (que corresponde a 25% das amostras ordenadas definidas pelo limite inferior do retângulo) e o terceiro quartil (que corresponde a 75% das observações ordenadas definidas pelo limite superior do retângulo). O traço horizontal dentro do retângulo indica a posição da mediana, o traço vertical superior conectado ao retângulo representa os valores acima do terceiro quartil e o traço vertical conectado abaixo representa os valores abaixo do primeiro quartil. O círculo que aparece dentro do retângulo representa a média. Asteriscos acima e abaixo dos traços verticais representam os pontos atípicos ou "*outliers*". Esta representação gráfica possibilita evidenciar a assimetria dos dados obtidos nos ensaios.

O segundo bloco de ensaios, como já citado no capítulo anterior, foi idealizado para analisar a influência do tipo de refino do aço inox ABNT 304 e 304 UF na vida e no mecanismo de desgaste que ocorre na ferramenta de corte. Para cada velocidade de corte ensaiada, progressivamente a cada seqüência de furos realizados, a ferramenta era fotografada, os cavacos eram recolhidos e o sinal de corrente do sistema de monitoramento da potência da máquina era gravado no formato de planilha. Deve-se ressaltar que para cada velocidade de corte ensaiada havia uma quantidade específica de furos realizados sequencialmente. Esta variação tinha como objetivo garantir um mínimo de dez fotos de cada aresta até que o fim de vida fosse alcançado.

4.2 A Força de Avanço

A força de avanço é definida como a projeção da força de usinagem na direção de avanço e no caso da furação esta força atua na direção do eixo da broca.

4.2.1 A Influência dos dois Materiais

Das duzentas leituras que foram realizadas da força de avanço, metade delas foi obtida na furação do aço ABNT 304 e a outra metade foi obtida na furação do aço V304 UF. Os parâmetros de usinagem utilizados para ensaiar o aço ABNT 304 foram os mesmos utilizados para ensaiar o aço V304 UF. O grupo de amostras do aço ABNT 304 contém os dados da força de avanço medidos no ensaio de furação realizados nas condições mais tênues, isto é, com velocidade de corte de 5 m/min e avanço de 0,06 mm/rev até os dados dos ensaios realizados com as condições mais severas com velocidade de corte de 25 m/min e avanço de 0,1 mm/rev. O gráfico da Figura 4.1 sumariza uma simples análise estatística dos dois materiais com relação a força de avanço.

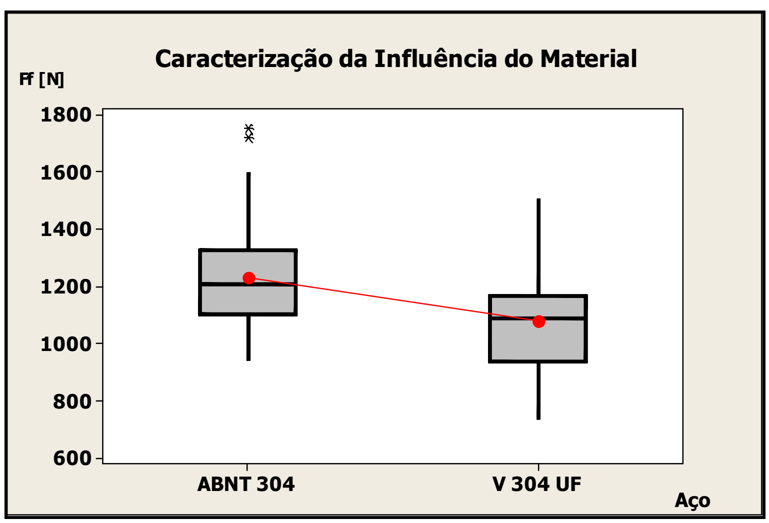


Figura 4.1 – Resultado global da força de avanço medida com broca de 6 mm. Vc = 5 – 25 m/min, fn = 0,06 – 0,10 mm/volta.

A média dos dados da força de avanço para o aço ABNT 304 é 1231 N com desvio padrão de 167 N e para o aço V304 UF é de 1077 N com desvio padrão de 190 N. Pode-se afirmar, após a realização de um teste de hipótese, que as duas médias das cem amostras da força de avanço da cada um dos dois aços são diferentes. A representação gráfica sugere, com base nas amostras analisadas, que se desenvolve uma força de avanço maior na furação do aço ABNT 304. De acordo com o gráfico, a dispersão dos dados dos dois grupos de forças não parece ser muito diferente. Os valores do desvio padrão comprovam isto.

4.2.2 A Influência dos Avanços Escolhidos

Seguindo o mesmo raciocínio apresentado anteriormente, o volume de dados coletados pode ser agrupado de acordo com os avanços que foram escolhidos para a realização dos ensaios. Os dois grupos tiveram cada um cem amostras. O grupo das amostras ensaiadas com avanço de 0,06 mm/rev contém os dados da força de avanço medidos no ensaio de furação realizados nos dois aços, isto é, os dados da força de avanço do aço ABNT 304 e do aço V304 UF realizados com as cinco velocidades de corte fazem parte de um mesmo conjunto de dados. O outro conjunto de dados apresenta a mesma característica, porém, só foram ensaiados com avanço de 0,10 mm/rev. O gráfico da Figura 4.2 caracteriza por meio da análise estatística a influência que existe do avanço na relação com a força de avanço.

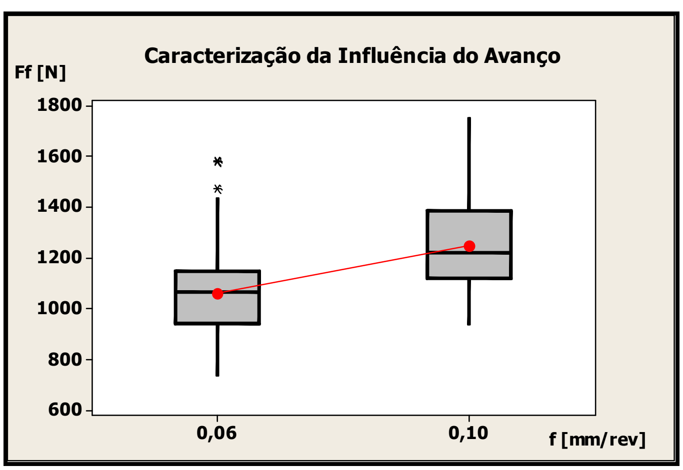


Figura 4.2 – Influência provocada pela escolha do avanço. Material: Aço ABNT 304 e V304 UF, broca helicoidal de 6 mm, Vc = 5 – 25 m/min.

A média dos dados da força de avanço para os ensaios realizados com avanço de 0,06 mm/rev é de 1061 N com desvio padrão de 172 N e os ensaios realizados com avanço de 0,10 mm/rev é de 1248 N com desvio padrão de 170 N. A realização de um teste de hipótese afirma o que o gráfico já expõe. O avanço menor gera uma força de avanço menor. Contudo, o crescimento da força, bem como aumento do avanço não ocorreu na mesma proporção. Enquanto o avanço cresceu em 66,67 %, isto é, de 0,06 mm/rev para 0,10 mm/rev, a força de avanço cresceu aproximadamente 20%.

Os dados resultantes dos ensaios podem ser organizados de tal forma que se tenha quatro grupos, classificados pelo material usinado e avanço utilizado no ensaio. Cada grupo com cinqüenta ensaios é composto de forças de avanço captadas com cinco rotações diferentes e dez réplicas, e se diferencia de outro grupo apenas pelo avanço por volta (0,06 mm/rev e 0,10 mm/rev) e pelo material ensaiado (aço ABNT 304 e aço V304 UF). Efetuando uma análise estatística de cada um destes grupos encontramos que a força de avanço é influenciada pelo material furado e pelo avanço escolhido (Figura 4.3).

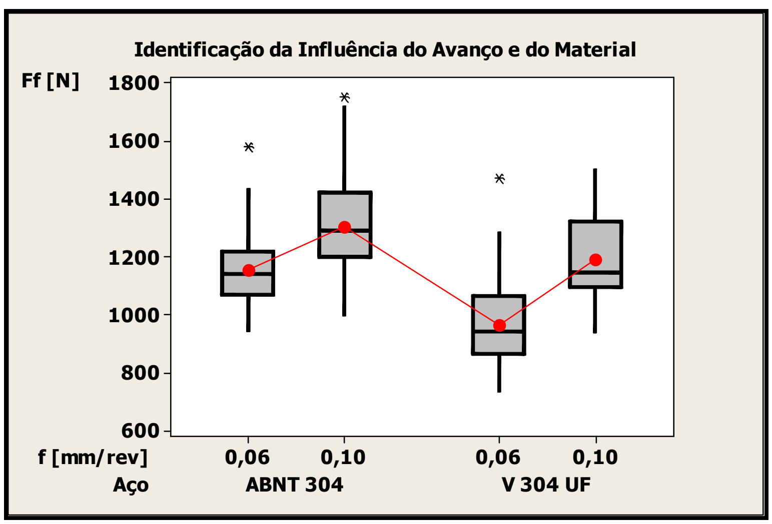


Figura 4.3 – Comparativos provocados nos materiais pelo avanço. Broca helicoidal de 6 mm. Vc = 5 – 25 m/min.

Observando os dados da Tabela 4.1 pode-se compreender a influência promovida em função da escolha do material e da definição do avanço da broca. Independente do avanço

escolhido, as menores forças de avanço se desenvolveram na furação do aço V304 UF, sendo a menor de 0,06 mm/rev.

Tabela 4.1 – Valores médios da força de avanço para grupos de 50 amostras

Material	Avanço [mm/rev]	Força de Avanço [N]	Desvio Padrão [N]
ABNT 304	0,06	1156,4	140,2
ABNT 304	0,10	1305,6	158,3
V 304UF	0,06	965	146,7
V 304UF	0,10	1190,7	162,5

Para os dois materiais analisados, as menores forças de avanço estão associadas ao menor avanço por revolução da broca. A variação percentual do crescimento da força de avanço com o avanço (equação 4.1) é diferente para os dois materiais. O crescimento percentual do avanço definido pela equação 4.1 é da ordem de 66,67 % para os dois materiais, mas o crescimento percentual (equação 4.2) da força é diferente.

$$\Delta f = \frac{(f_2 - f_1)*100}{f_1} \qquad \text{equação 4.1}$$

$$\Delta F_f = \frac{(F_{f2} - F_{f1})*100}{F_{f1}} \qquad \text{equação 4.2}$$

Para o aço ABNT 304 o acréscimo do avanço em 66,67% implicou no acréscimo da força de avanço de 12,9 %, mas para o aço V304 UF a mesma variação do avanço por volta implicou em um acréscimo de 23,3 % na força de avanço. Outra comparação interessante pode ser feita em relação a diferença percentual das forças de avanço dos dois materiais. Para o avanço de 0,06 mm/rev a variação da força entre os dois materiais é da ordem de 19,83 %, sendo maior a força de avanço do aço ABNT 304, no entanto quando se trata do avanço de 0,10 mm/rev, a variação percentual cai para 9,64 %. Estas observações sugerem que os dois materiais têm um

valor de ks diferentes um do outro e que o comportamento da variação do ks com a variação da seção do cavaco é diferente para os dois materiais.

4.2.3 A Influência das rotações escolhidas

Normalmente, a variação da força de avanço com a velocidade de corte é bem mais pronunciada que a variação da força de corte com a velocidade de corte (DINIZ e MARCONDES, 1999). A presença de aresta postiça de corte tem a influência de diminuir a força específica de corte (ks) devido ao efeito do aumento artificial do ângulo efetivo de saída promovido pela alteração momentânea da geometria da área de corte. Neste delineamento, foram escolhidas cinco velocidades de corte com o propósito de verificar a variação da força de corte em função da velocidade para os dois aços. O gráfico da Figura 4.4 mostra as fontes de variação que se refletem na força de avanço durante os ensaios de furação realizados com a broca de 6 mm.

Os ensaios realizados com o aço ABNT 304 são indicados no gráfico pelas linhas que ligam os marcadores circulares e os ensaios realizados com o aço V304 UF estão representados pelas linhas que ligam os marcadores quadrados. A diferenciação do avanço utilizado na furação dá-se pelo estilo da linha, sendo que a linha contínua foi utilizada para o menor avanço e a linha tracejada para o maior avanço.

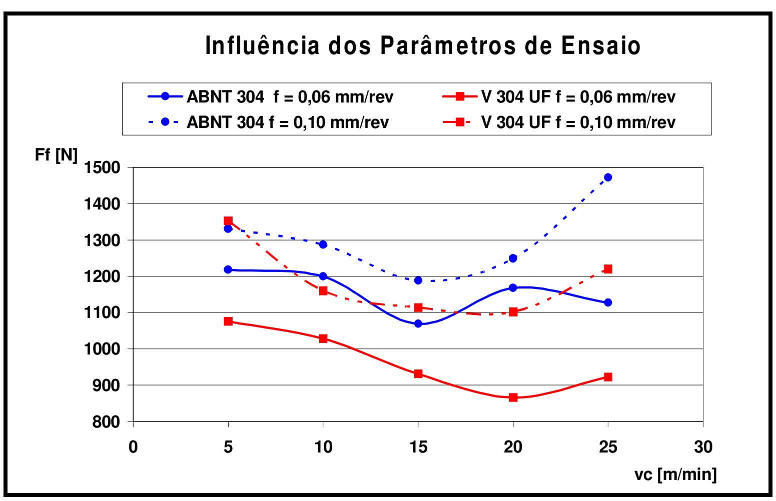


Figura 4.4 – Fatores de influência na força de avanço

Nota-se que avanços maiores estão associados a forças de avanço maiores para um mesmo tipo de material. Esta relação está presente para os dois materiais representados na Figura 4.4. Ainda observa-se que a força de avanço medida na furação do aço V304 UF é quase sempre menor que a força de avanço medida na furação do aço ABNT 304 nas mesmas condições de ensaio.

As diferentes velocidades de corte produziram médias de força de avanço que são diferentes. Assim, um material que foi ensaiado com o mesmo avanço nas cinco velocidades tem cinco médias que não são totalmente iguais. Os testes estatísticos realizados mostram que existe uma diferença entre estas médias. Este comportamento pode ser percebido nas quatro curvas mostradas no gráfico. Na representação gráfica, a linha que conecta os cinco pontos (as cinco velocidades de corte diferentes que foram ensaiadas) permite a interpretação visual da influência da velocidade de corte na força de avanço. Aparentemente, na região de velocidades de corte entre 15 m/min e 20 m/min haveria para todos os dois materiais, nas duas velocidades de avanço ensaiadas, um valor de velocidade de corte (que poderia ser diferenciada para cada material e condição de avanço) onde a força de avanço atingiria um valor mínimo. Isto ocorreu devido ao fato de que nesta faixa de velocidade de corte, a ocorrência da formação da aresta postiça de corte diminuiu (Figura 4.5), reduzindo a força de avanço. Um comportamento similar da força de corte pode ser identificado em Fang e Zhang (1996). A utilização da velocidade de corte como uma variável de ensaio visava determinar qualquer influência da velocidade de corte na força de avanço da broca. A realização de um teste de hipóteses mostra que a média da força de avanço não é igual nos cinco pontos ensaiados, ou seja, a hipótese alternativa das médias das forças de avanço ser diferente entre si é válida dentro de um intervalo de confiança de 5%.

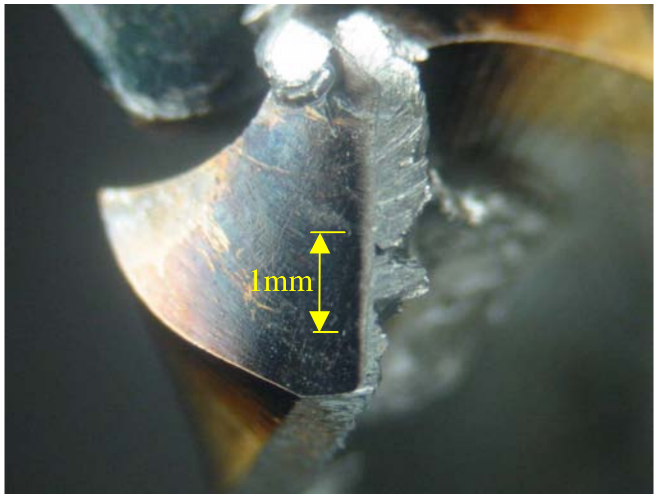


Figura 4.5 – Aresta postiça de corte. Aço V304 UF, Velocidade de corte de 28,2 m/min, avanço de 0,09 mm/rev.

4.3 O momento torsor

O momento torsor no processo de furação é resultado do produto da projeção de elementos diferenciais da força de corte por elementos diferenciais do raio da broca medido no plano perpendicular à direção de avanço. No processo de furação, a direção do avanço é alinhada com o eixo da broca.

4.3.1 A Influência dos dois materiais

O gráfico da Figura 4.6 resume uma análise estatística dos dois materiais no momento torsor. A média das cem amostras do aço ABNT 304 durante a furação gerou um momento torsor médio de 248 N.cm com dispersão de 53 N.cm. Tão elevada dispersão pode ser explicada pela presença de outros fatores de influência presentes nas amostras, tais como os dois níveis diferentes de avanço e ainda cinco níveis diferentes de rotação. Já a média do momento torsor necessário para furar as cem amostras de aço V304 UF fixou-se em 193 N.cm com dispersão de 44 N.cm. Os mesmos fatores que afetaram amostras de aço ABNT 304 estão presentes no aço V304 UF nos mesmos níveis.

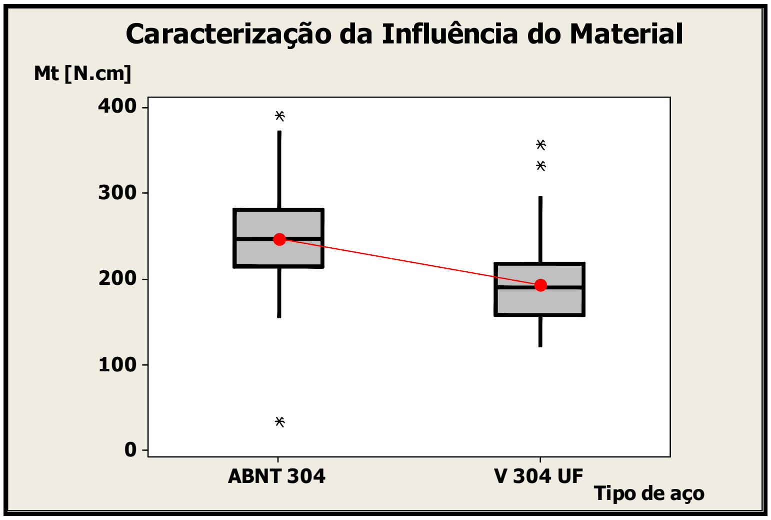


Figura 4.6 – Resultado global da força de avanço medida com broca de 6 mm. Vc = 5 – 25 m/min, fn = 0,06 – 0,10 mm/rev.

Mesmo considerando todas estas influências, pode-se afirmar que as duas amostras são diferentes e que para furar o aço inoxidável ABNT 304 demanda-se 28 % a mais de torque que quando se fura o aço V304 UF. Um torque menor significa uma potência menor consumida, para a mesma rotação ensaiada.

4.3.2 A Influência dos Avanços Escolhidos

A Figura 4.7 mostra a influência que o avanço exerce sobre o momento torsor. A média dos dados do momento torsor para os ensaios realizados com avanço de 0,06 mm/rev é de 191,98 N.cm com desvio padrão de 48,97 N.cm e os ensaios realizados com avanço de 0,10 mm/rev é de 248,50 N.cm com desvio padrão de 47,62 N.cm. O avanço menor gera um momento torsor menor. Tal como ocorre com a força de avanço o crescimento do momento torsor com o avanço não ocorre na mesma proporção. Enquanto o avanço cresceu em 66,67 %, isto é, de 0,06 mm/rev para 0,10 mm/rev, o momento torsor cresceu aproximadamente 30%.

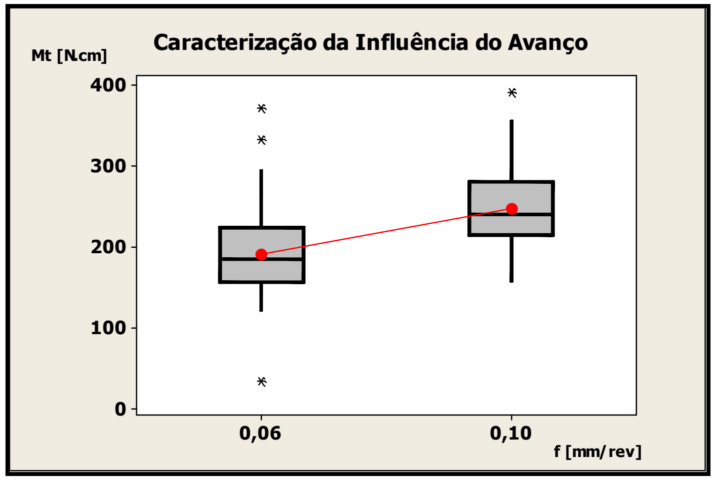


Figura 4.7 – Influência provocada pela escolha do avanço. Material: Aço ABNT 304 e V304 UF, broca helicoidal de 6 mm, Vc = 5 – 25 m/min.

O procedimento experimental utilizado permite agrupar os dados do momento torsor de tal forma que se tenha quatro grupos, classificados pelo material usinado e avanço utilizado no ensaio. Cada grupo com cinqüenta ensaios é composto de momento torsor captados com cinco rotações diferentes e dez réplicas, e diferencia-se de outro grupo apenas pelo avanço por volta (0,06 mm/rev e 0,10 mm/rev) e pelo material ensaiado (aço ABNT 304 e aço V 304UF). Efetuando-se uma análise estatística de cada um destes grupos, da mesma forma que força de avanço, o momento torsor é influenciado tanto pelo material que é furado quanto pelo avanço escolhido (Figura 4.8).

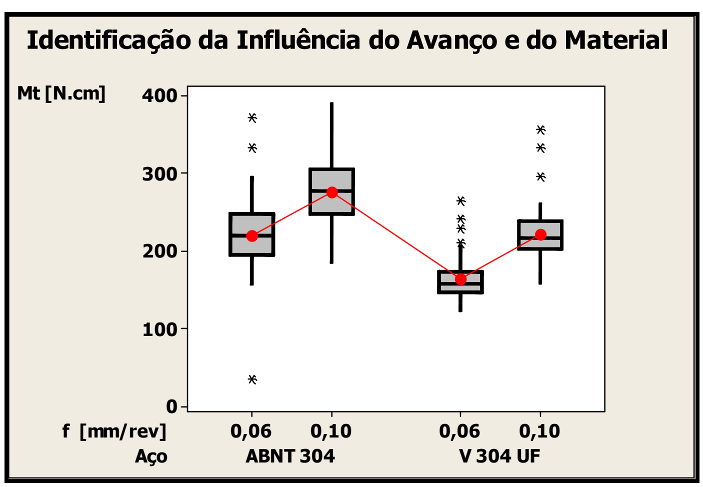


Figura 4.8 – Comparativos das influências provocada pelo material e pelo avanço, broca helicoidal de 6 mm, Vc = 5 – 25 m/min.

Na Tabela 4.2 estão os valores médios e a dispersão de cada um dos quatro grupos de dados do momento torsor. A observação destes dados permite caracterizar a parcela da influência do material da peça e do avanço por volta no valor do momento torsor. Tal como na força de avanço, os menores valores do momento torsor desenvolvem-se na furação do aço V 304UF qualquer que seja o avanço escolhido, e a menor força de avanço ocorre quando se utiliza o avanço de 0,06 mm/rev.

Tabela 4.2 – Valores médios do momento torsor para grupos de 50 amostras

Material	Avanço [mm/rev]	Momento Torsor [N.cm]	Desvio Padrão [N.cm]
ABNT 304	0,06	219,77	49,23
ABNT 304	0,10	275,69	40,97
V 304UF	0,06	164,19	29,08
V 304UF	0,10	221,31	37,34

Para os dois materiais analisados, os menores valores médios do momento torsor, da mesma forma que as menores forças de avanço, estão associadas ao menor avanço por revolução da broca. A variação percentual do crescimento do momento torsor com a variação percentual do avanço (equação 4.1) é diferente para os dois materiais. O crescimento percentual do avanço definido pela equação 4.1 é da ordem de 66,67 % para os dois materiais, mas o crescimento percentual (equação 4.3) do momento é diferente.

$$\Delta M_t = \frac{(M_{t2} - M_{t1})*100}{M_{t1}} \qquad \text{equação 4.3}$$

Para o aço ABNT 304, o acréscimo do avanço em 66.67 % implicou no acréscimo do momento torsor de 25,44 %, contudo para o aço V304 UF, a mesma variação do avanço por volta implicou num acréscimo de 34,78 % no momento torsor. Outra comparação interessante pode ser feita com relação à diferença percentual do momento torsor dos dois materiais. Para o avanço de 0,06 mm/ver, a variação do momento torsor entre os dois materiais é da ordem de 33,85 %, sendo

maior o momento torsor do aço ABNT 304, mas quando se trata do avanço de 0,10 mm/rev a variação percentual cai para 24,57 %. É importante ressaltar que estas análises foram feitas tomando como base os resultados obtidos dos ensaios. Estas observações somadas às considerações feitas com relação à força de avanço somente confirmam a correlação entre a força de avanço e o momento e permitem concluir que os dois materiais têm um valor de ks e ks diferentes um do outro, e ainda que o comportamento da variação do ks com a variação ks da seção do cavaco é diferente para os dois materiais.

4.3.3 A Influência das velocidades de corte escolhidas

A Figura 4.9 mostra que os avanços maiores estão associados a momentos torsores maiores para um mesmo tipo de material. Isto se deu devido ao fato que o aumento do avanço reflete no aumento da seção do cavaco e na taxa de encruamento do mesmo, aumentando-se assim as forças de usinagem. Esta relação também foi comprovada para a força de avanço. Observa-se também que o momento torsor na furação do aço V304 UF é quase sempre menor que o momento torsor medido na furação do aço ABNT 304 nas mesmas condições de ensaio.

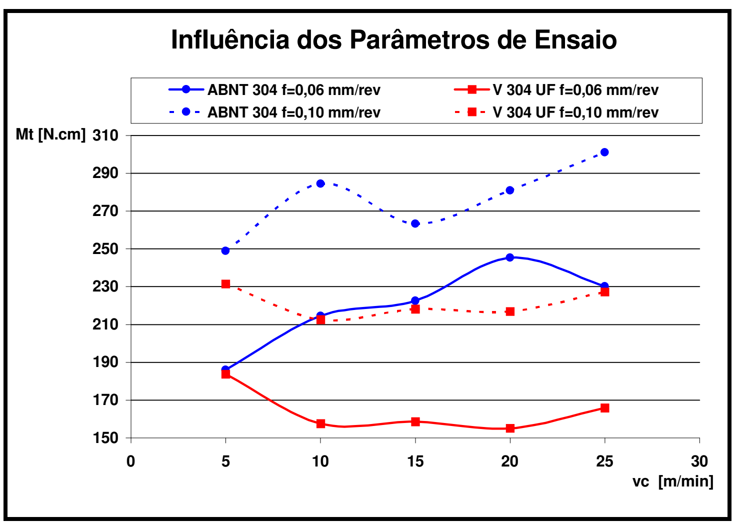


Figura 4.9 – Fatores de influência no momento torsor

O agrupamento dos dados de ensaio pela variável velocidade de corte permite a formação de cinco grupos de dados do momento torsor, cada um com quarenta amostras. Para os quatro grupos de velocidade de 10 a 25 m/min os dados permitem afirmar que o momento torsor é sempre maior quando se fura o aço ABNT 304. Somente para a velocidade de 5 m/min a dispersão dos dados não permite afirmar, dentro de um intervalo de confiança de 95 %, que existe diferença entre os dois aços. As maiores velocidades de corte produziram médias de momento torsor diferentes entre os dois materiais, exceto para a velocidade de 5 m/min.

O agrupamento dos dados do momento torsor em dois grandes grupos de 100 amostras cada, classificados pelo material da amostra, permite por intermédio de uma análise de variância, afirmar que para o aço ABNT 304 existe uma diferença de valores entre as cinco médias de dados classificadas pela velocidade de corte. Já para o aço V304 UF não se pode afirmar, com confiança estatística, que existe esta diferença. Este comportamento pode ser percebido nas quatro curvas mostradas no gráfico. Na representação gráfica, a linha que interliga os cinco pontos (as cinco velocidades de corte diferentes que foram ensaiadas) permite a interpretação visual da influência da velocidade de corte no momento torsor.

Aparentemente, para o aço ABNT 304 existe uma tendência de crescimento do momento torsor com o aumento da velocidade de corte e esta tendência está bem clara para os dois avanços ensaiados. Já para o aço V304 UF, haveria para os valores ensaiados tendências de estabilização do momento torsor. Como existe uma relação direta entre a força de corte e o momento torsor é correto afirmar que a velocidade de corte influencia a força de corte na furação do aço ABNT 304, mas esta influência é minimizada quando se fura o aço V304 UF.

A utilização da velocidade de corte como uma variável de ensaio visava determinar se haveria qualquer influência da velocidade de corte no momento de torção da broca. A realização de um teste de hipóteses mostra que existe uma influência da rotação na furação do aço ABNT 304, contudo esta influência torna-se desprezível quando se fura o aço V304 UF dentro de um intervalo de confiança de 5%.

Provavelmente, a razão para essas diferenças está no fato de que a composição química do aço ABNT 304 resulta em uma microestrutura que, sob a ação dos esforços de usinagem, a austenita acaba transformando-se em martensita dificultando assim a usinagem. Com grande chance, o mesmo fenômeno ocorre na usinagem do aço V304 UF, porém em quantidades

menores. Isto porque a alteração na morfologia nas inclusões duras através do controle da composição química e da técnica de desoxidação na fabricação do aço possibilita a obtenção de inclusões com baixo ponto de fusão, obtendo assim um efeito lubrificante na ferramenta e uma facilitada quebra de cavacos, reduzindo assim os esforços de usinagem.

4.4 A potência de furação

O resultado da medição do momento torsor necessário para realizar o furo torna possível avaliar o consumo de potência no processo de furação dos dois aços analisados para todas as velocidades ensaiadas. O gráfico da Figura 4.10 mostra a variação da potência em função dos parâmetros de usinagem escolhidos.

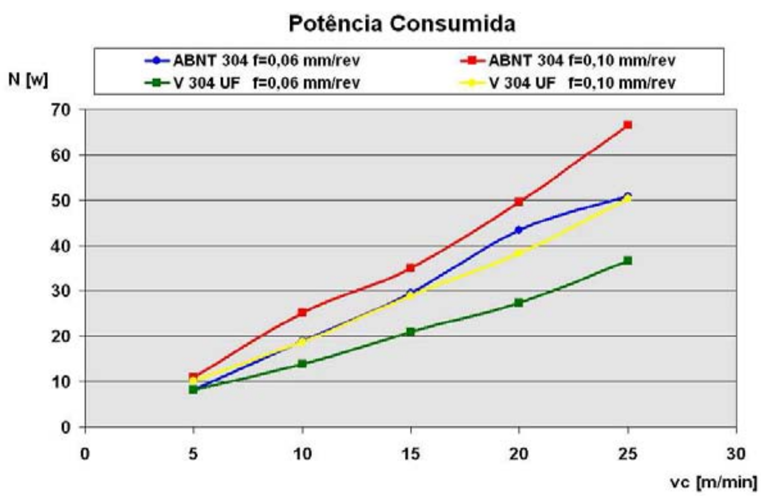


Figura 4.10 – Variação de potência consumida de furação.

A potência consumida é uma função linear da rotação e, portanto, da velocidade de corte. Assim, a tendência do crescimento da potência bem como a velocidade de corte já estava esperada para todos os aços e em todas as condições de avanços adotados. Também é perfeitamente identificável no gráfico a influência do avanço por volta na potência de furação. Avanços por volta maiores demandam maior potência necessária para realizar o furo.

O gráfico da Figura 4.10 mostra que a potência necessária para furar o aço V304 UF é menor que a potência necessária para furar o aço ABNT 304 nas mesmas condições de avanço.

Ainda, a Figura 4.10 mostra que a demanda por potência da máquina ferramenta é praticamente idêntica quando se fura o aço ABNT 304 com avanço de 0,06 mm/rev ou quando se fura o aço V304 UF na condição que gera maior produtividade, isto é, com avanço de 0,10 mm/rev. Como já exposto no item anterior, provavelmente este fato ocorreu porque em baixas velocidades de corte, as modificações na composição química do aço V304 UF não tiveram um efeito significativo no par ferramenta peça, o que gerou um comportamento semelhante nos dois materiais testados.

4.4.1 O monitoramento do sinal de potência

Com o intuito de avaliar a sensibilidade do sistema analógico para monitorar o desgaste de brocas de pequeno diâmetro, foi projetada, montada e instalada dentro do CNC, uma caixa eletrônica equipada com um controlador lógico programável. Como o sistema era de 10 bits, a resolução da leitura do sinal elétrico permitia diferenciar frações de potência de 0,097 % da potência do motor da árvore principal. O sistema digital desenvolvido monitorava o sinal da corrente consumida durante a realização dos ensaios de vida. Assim, para cada furo que antecedia a parada da máquina para inspeção da aresta de corte, os dados resultantes do monitoramento da corrente (ou indiretamente da potência) consumida durante a realização do furo, eram salvos em arquivo. Isto significa que para cada broca que foi submetida ao ensaio de vida, foram gerados dez arquivos de captura do sinal da corrente. Um total de cem arquivos foi analisado. A Figura 4.11 mostra o sinal capturado sem nenhum tratamento de software. Nesta Figura, nota-se que a relação entre o sinal e o ruído não é muito boa.

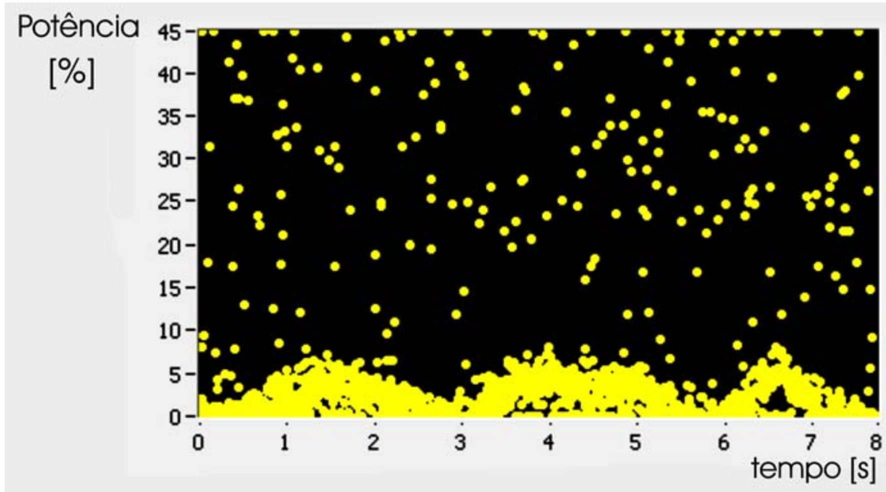


Figura 4.11 – Sinal capturado do sistema de monitoramento.

O módulo do sinal capturado deve ser observado considerando-se que ele está afetado pelo rendimento do sistema mecânico, pela potência necessária para fazer girar o eixo-árvore principal, o porta pinças, a potência consumida na furação e por fontes não identificadas de ruído. O tratamento dos dados através do uso de filtros de médias permitiu transformar o sinal da Figura 4.12 em um sinal no qual se tornava possível identificar o acréscimo de potência decorrente da realização da furação. A baixa resolução do sistema de digitalização somente permitia uma quantização do sinal da potência em incrementos de 19,5 W. Este valor de sensibilidade é o resultado da razão entre a potência total do motor e o número de bits de resolução do sistema de monitoramento em escala decimal. Assim, as alterações do sinal mostrado na Figura 4.11 apresentam flutuações que são múltiplas do valor da quantização de 19,5 W. O valor médio efetivo deste sinal é indicado na linha horizontal situada próxima de 380 W do gráfico da Figura 4.12. Para cada um dos dez arquivos de sinais capturados foi calculado o valor médio por ensaio de desgaste da broca. A comparação deste valor médio, desde o primeiro furo realizado com a broca até ela atingir o final de vida pré-estabelecida, não foi capaz de identificar o aumento da potência com o crescimento do desgaste. Infelizmente, a não identificação da fonte de ruído durante o ensaio de desgaste e a baixa resolução do sistema de digitalização, impediram a identificação da provável progressividade do crescimento da potência consumida na furação com a evolução do aumento do desgaste de flanco nas arestas principais da broca.

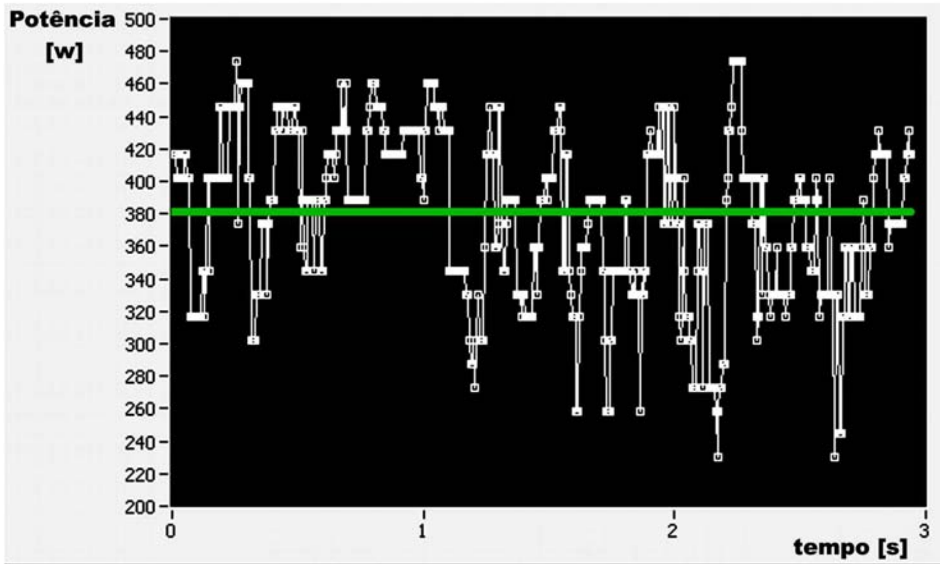


Figura 4.12 – Filtragem do sinal capturado do sistema de monitoramento.

Deve-se observar a Figura 4.12 com uma certa cautela. A medição efetuada foi do sinal da corrente elétrica que alimenta o motor do fuso e não se fez medição direta da potência consumida. A construção deste gráfico baseia-se na relação de proporcionalidade entre a corrente e a potência e tem como função demonstrar a falta de sensibilidade do sistema de monitoramento em relação às baixas potências que precisavam ser medidas. Assim, observando o gráfico da Figura 4.10 e o gráfico da Figura 4.11, nota-se como é difícil monitorar com sistemas simples a evolução do desgaste de brocas de pequeno diâmetro, baseando-se no sinal de corrente elétrica (potência) do eixo árvore principalmente quando a potência de acionamento é alta quando comparada à potência consumida pela broca.

4.5 Ensaios de desgaste e vida

4.5.1 O ensaio de desgaste da ferramenta no aço ABNT 304

Para a realização do ensaio de desgaste no aço ABNT 304 estava disponível um bloco de 30 x 200 x 400 mm, sete brocas helicoidais de aço rápido M2 com cobertura de nitreto de titânio de diâmetro de 6 mm com ângulo de ponta de 118 graus e geometria conforme norma DIN 338 N. Em função da disponibilidade restrita de material optou-se pela realização de furos cegos de profundidade de 12 mm, viabilizando assim a utilização as duas faces da placa.

Duas das sete brocas foram utilizadas em ensaios prévios de desgaste para definir as velocidades limites de ensaio e a seqüência de furos a ser realizada antes da inspeção periódica da aresta principal de corte e o critério de fim de vida. Esta definição foi importante, pois a seqüência de furos realizada entre as inspeções da aresta determinava o número de amostras do processo de monitoramento da potência consumida na furação. Definidas as velocidades limites, as velocidades de corte intermediárias foram determinadas de tal forma que o espaçamento entre elas fosse igual em uma escala logarítmica. A seqüência de furos realizada entre as inspeções da aresta de corte é função da velocidade de corte, pois desejava construir cada curva de desgaste com um mínimo de 10 pontos, desde o início dos ensaios até o critério de fim de vida.

Para garantir que as medições de desgaste não consumissem grande parte do tempo de ensaio, foram feitas duas impressões de microdureza distantes da aresta principal de corte com 0,3 mm e eqüidistantes entre si de 1,0 mm. Durante o ensaio, a aresta foi fotografada e rapidamente avaliada em relação ao valor do desgaste VB. Este procedimento permitia posteriormente identificar o material aderido à aresta principal e realizar medições precisas do desgaste VB utilizando o Software *The Gimp* sem a necessidade de manter a máquina de ensaios parada.

A Tabela 4.3 mostra as velocidades de corte ensaiadas, o número de furos realizados entre as inspeções da aresta de corte e as expectativas de número de furos a serem obtidas na curva de ensaio de vida até que o critério de fim de vida fosse alcançado.

Tabela 4.3 Parâmetros do ensaio de desgaste do aço ABNT 304

Velocidade de corte m/min	Intervalo de furos	Expectativa de furos
12,5	16	160
13,6	14	140
14,8	6	60
16,1	3	30
17,5	2	20
Avanço por volta = 0,09 mm/rev VBmáx = 0,2 mm		

Na Figura 4.13 estão agrupadas as cinco curvas de desgaste do aço ABNT 304 ensaiadas com as velocidades constantes na Tabela 4.3. As curvas foram obtidas plotando o par ordenado desgaste VBmáx medido na aresta principal pelo produto do número de furos ensaiados vezes o comprimento do furo. Tal como esperado para velocidades de corte menores, estão associados a estas os maiores comprimentos usinados. Para as velocidades de corte maiores houve uma redução do número de furos realizados e uma aceleração do desgaste da broca. Os resultados mostram que a broca de aço rápido é extremamente sensível ao aumento da velocidade de corte na furação do aço inoxidável austenítico.

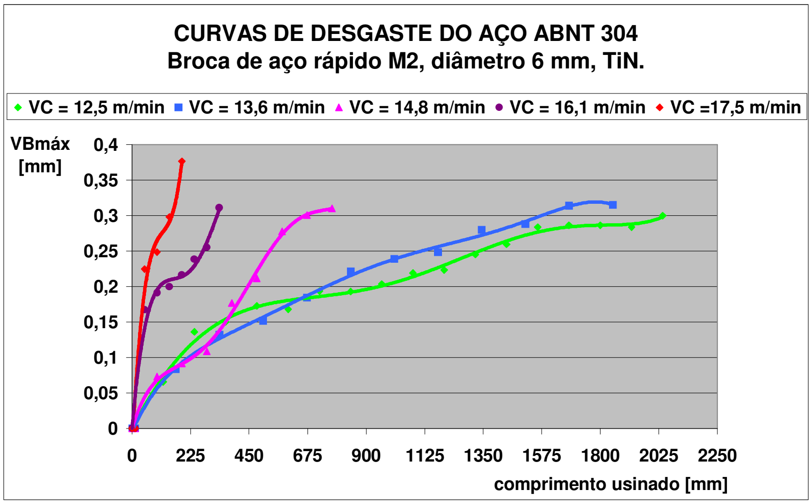


Figura 4.13 – Curvas de desgaste da broca de 6 mm HSS TiN

4.5.2 O ensaio de desgaste da ferramenta no aço V304 UF

Para a realização do ensaio de desgaste no aço V304 UF, a mesma quantidade de material e ferramenta do ensaio citado anteriormente estavam disponíveis. Duas das sete brocas foram utilizadas em ensaios prévios de desgaste para definir as velocidades limites de ensaio e a seqüência de furos a ser realizada antes da inspeção periódica da aresta principal de corte e o critério de fim de vida. Isto se fazia necessário em função da premissa de melhor usinabilidade do aço V304 UF e da restrição da quantidade de material disponível. Com base nesses ensaios, ficou definido velocidades entre 17,5 m/min e 33 m/min. As velocidades de corte intermediárias foram determinadas também utilizando uma escala logarítmica.

A Tabela 4.4 mostra as velocidades de corte ensaiadas, o número de furos realizados entre as inspeções da aresta de corte e as expectativas de número de furos a serem obtidas na curva de ensaio de vida até que o critério de fim de vida seja alcançado.

Tabela 4.4 - Parâmetros do ensaio de desgaste do aço V304 UF

Velocidade de corte m/min	Intervalo de furos	Expectativa de furos
17,5	40	400
20,5	28	280
24,0	19	190
28,2	13	130
33,0	9	90
Avanço por volta = 0,09 mm/ver. VBmáx = 0,2 mm		

As curvas da Figura 4.14 foram obtidas plotando o par ordenado desgaste $V_{Bmáx}$ medido na aresta principal pelo produto do número de furos ensaiados vezes o comprimento do furo. Nota-se nestas curvas a mesma tendência de comportamento, ou seja, velocidades menores associadas a uma maior duração da aresta de corte.

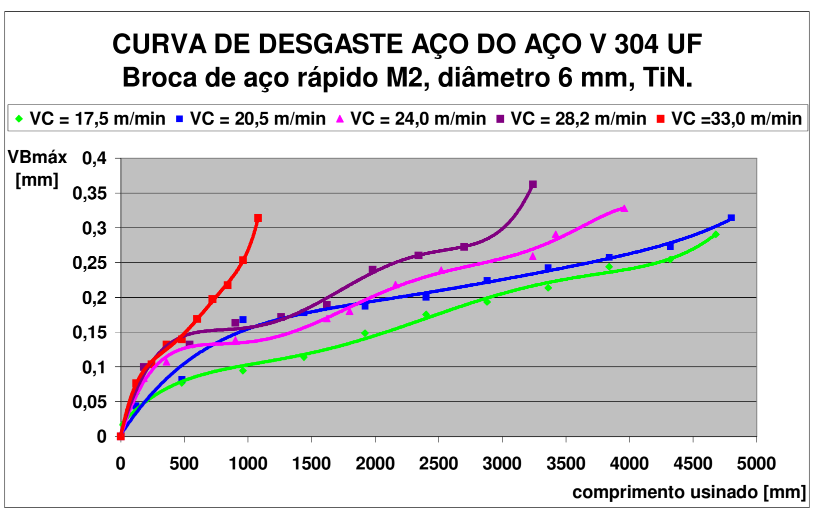


Figura 4.14 – Resultados dos desgastes para o aço V304 UF

A única velocidade de corte comum nos dois ensaios é a velocidade de 17,5 m/min. Esta velocidade foi a máxima utilizada no ensaio de desgaste com o aço ABNT 304 e o comprimento usinado neste material foi 150 mm. No ensaio de desgaste com broca de mesmo diâmetro no aço V304 UF a velocidade mínima utilizada foi de 17,5 m/min e, com o mesmo critério de fim de vida, foi possível furar um comprimento de 4.750 mm. Estes resultados evidenciam que furar o aço V304 UF é mais produtivo que furar o aço ABNT 304, pois um maior comprimento usinado implica em menos parada de máquina para troca de ferramenta.

4.5.3 Curva de Vida para os dois materiais testados

A equação de Taylor na forma simplificada (equação 4.4) é a expressão da função da vida da ferramenta e a sua correlação com a velocidade de corte.

$$T = Kv_c^{-x} \qquad \text{equação 4.4}$$

O desenvolvimento desta equação onde K e –x são constantes leva a seguinte expressão:

log(T) = logK. -xlog(vc) equação 4.5

Segundo Dino Ferraresi (1986), K e x são constantes do material para determinada condição de usinagem.

O expoente x é o coeficiente angular da reta no diagrama dilogaritmo e a constante K representa a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min.

Utilizando-se dos dados disponíveis do ensaio de desgaste pode-se plotar um gráfico onde as abscissas representam o logaritmo da velocidade de corte ensaiada e as ordenadas, o logaritmo do tempo de vida segundo um determinado critério de fim de vida, estabelecido o par ordenado (log vc, log T), e por regressão linear obter os valores das constantes K e –x.

O gráfico da Figura 4.15 apresenta as duas regressões lineares com as constantes da equação da reta que representa a vida da ferramenta de aço rápido revestida com TiN na usinagem dos dois aços inoxidáveis. O critério de fim de vida estabelecido foi o desgaste $V_{Bmáx}$ igual a 0,2 mm, isto é, os pontos utilizados para cálculo da equação da vida foram retirados dos gráficos das Figuras 4.13 e 4.14 quando a ordenada foi 0,2 mm. Para os respectivos comprimentos furados, levando-se em conta as rotações e o avanço por volta (constante em todos os ensaios), o tempo de corte pode ser calculado. De posse desses dados, os valores dos logaritmos foram calculados e as curvas ajustadas pela técnica dos mínimos quadrados.

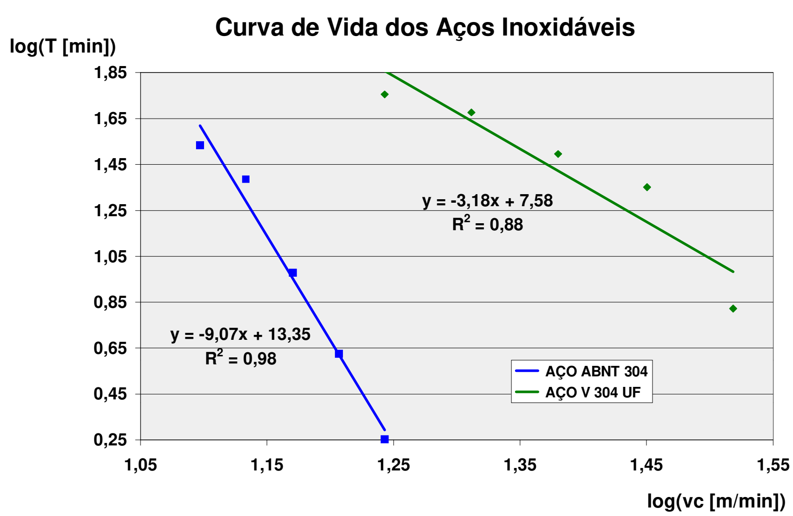


Figura 4.15 Gráfico comparativo da vida dos dois materiais.

Observando a Figura 4.15 pode-se perceber que o coeficiente de correlação da reta para o aço ABNT 304 está evidenciando que o erro experimental durante o ensaio de vida foi muito pequeno. Já para o aço V304 UF o fator de correlação foi um pouco menor e isto pode ser percebido pela dispersão dos cinco pontos de ensaio ao longo da reta.

Analisando as equações das retas que representam a vida da ferramenta para os dois materiais testados, percebe-se que para o aço ABNT 304 a vida da ferramenta é menor para baixas velocidades de corte quando comparada com o aço V304 UF.

A melhoria da usinabilidade do aço V304 UF começou aparecer em condições de usinagem mais severas onde as inclusões de baixo ponto de fusão e o controle da morfologia das inclusões duras passaram a ter uma ação mais eficiente permitindo elevar a velocidade de corte.

Segundo Dino Ferraresi (1986), acredita-se que a razão para tal fato é devido à reações químicas que ocorrem na interface ferramenta cavaco. No caso do aço V304 UF, em velocidades de corte mais elevadas, essas reações químicas resultam em menor formação de martensita induzida por deformação, reduzindo a taxa de encruamento do cavaco, conseqüentemente os esforços de usinagem.

Para o aço ABNT 304, o valor da tangente determina a inclinação da reta e é pelo menos três vezes maior que o valor da tangente da reta do aço V304 UF. Valores de tangente menores (em módulo) significam menor inclinação da curva, ou seja, a variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte é menor.

Assim, pode-se perceber que um bom parâmetro de configuração da usinabilidade de dois materiais é a expressão da equação de Taylor. O material que apresenta o módulo do expoente –x maior possui uma usinabilidade menor, isto é, desgasta mais rapidamente com o aumento da velocidade de corte. A comparação dos módulos e do valor da tangente é interessante, pois permite a comparação de diferentes curvas de vida realizadas em diferentes velocidades de corte.

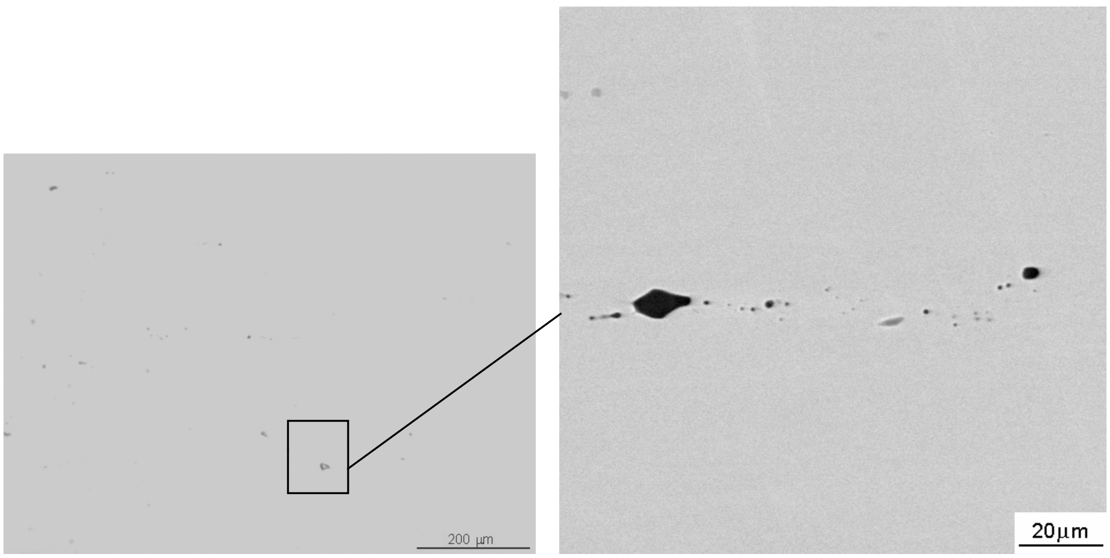
4.6 – Exame metalográfico do material da peça

Para entender melhor, sob a ótica metalúrgica, as diferenças nas medidas dos esforços de usinagem entre os aços ABNT 304 e V304 UF, foi realizado um exame metalográfico em amostras destes materiais. Cabe lembrar que ambos os aços atendem rigorosamente às especificações da norma.

4.6.1 – Exame metalográfico do aço ABNT 304

A Figura 4.16 mostra duas imagens. A primeira (a) mostra a imagem obtida em microscópio ótico da superfície longitudinal da barra na condição “como polida”. Ela mostra o nível (quantidade e distribuição) das microinclusões nesta versão de aço. Nota-se a presença de poucas microinclusões distribuídas aleatoriamente e de formato predominantemente globular.

A segunda imagem (b), obtida em microscópio eletrônico de varredura (MEV), é uma ampliação da área demarcada na imagem (a). Esta ampliação visou facilitar a identificação das microinclusões por análise de raios X (WDS).



(a) (b)

Figura 4.16 – (a) imagem obtida em microscópio óptico mostrando o nível de microinclusões presentes no aço ABNT 304. Superfície longitudinal da barra na condição como polida. Aumento 100X. (b) Imagem eletrônica de elétrons retroespalhados obtidas em MEV. Ampliação da área demarcada na imagem (a). Aumento 1.000X.

As Figuras 4.17 a 4.22 apresentam as análises de raios X via WDS do aço ABNT 304.

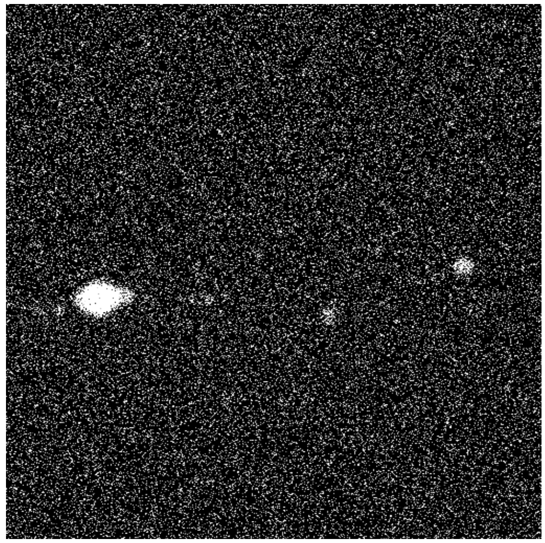


Figura 4.17 – Mapeamento por raios X do alumínio via WDS do aço ABNT 304. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do alumínio e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de alumínio. Aumento: 1.000X.

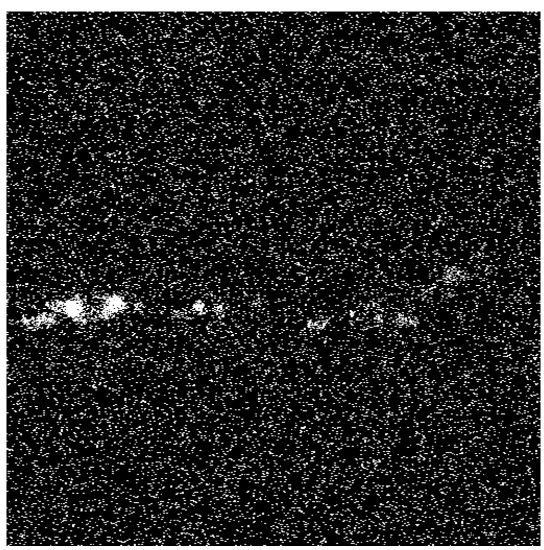


Figura 4.18 – Mapeamento por raios X do cálcio via WDS do aço ABNT 304. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do cálcio e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de cálcio. Aumento: 1.000X.

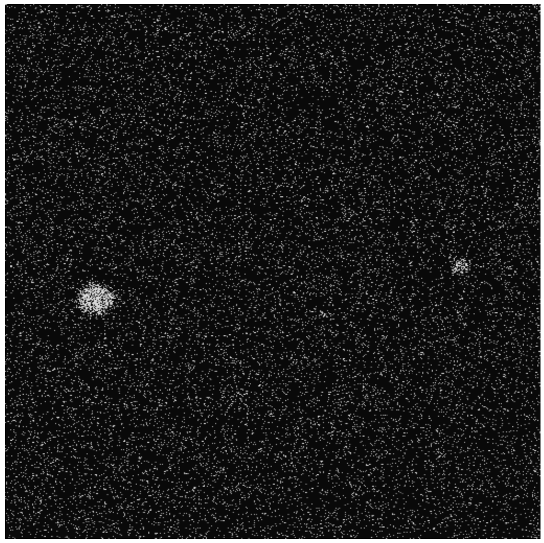


Figura 4.19 – Mapeamento por raios X do magnésio via WDS do aço ABNT 304. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do magnésio e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de magnésio. Aumento: 1.000X.

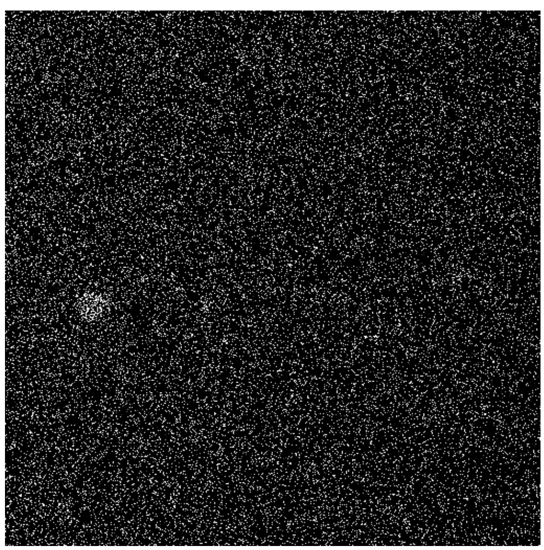


Figura 4.20 – Mapeamento por Rraios X do manganês via WDS do aço ABNT 304. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do manganês e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de manganês. Aumento: 1.000X.

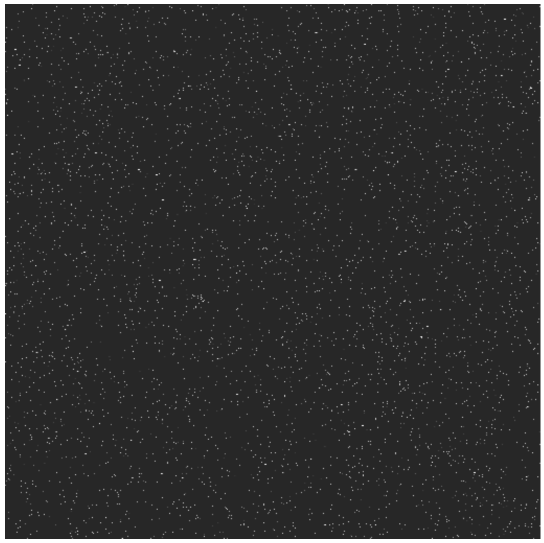


Figura 4.21 – Mapeamento por raios X do enxofre via WDS do aço ABNT 304. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do enxofre e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de enxofre. Aumento: 1.000X.

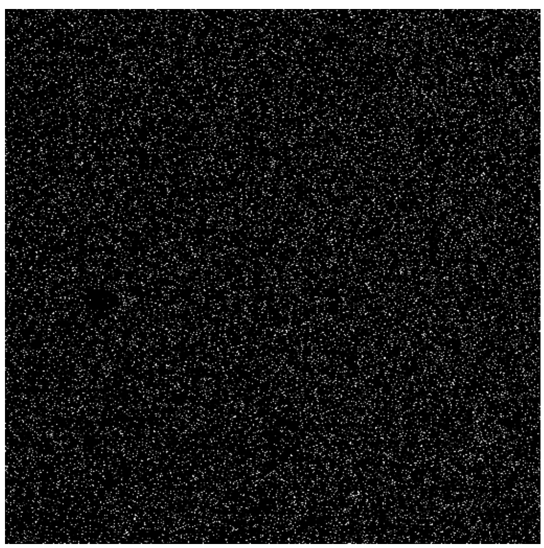


Figura 4.22 – Mapeamento por raios X do silício via WDS do aço ABNT 304. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do silício e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de silício. Aumento: 1.000X.

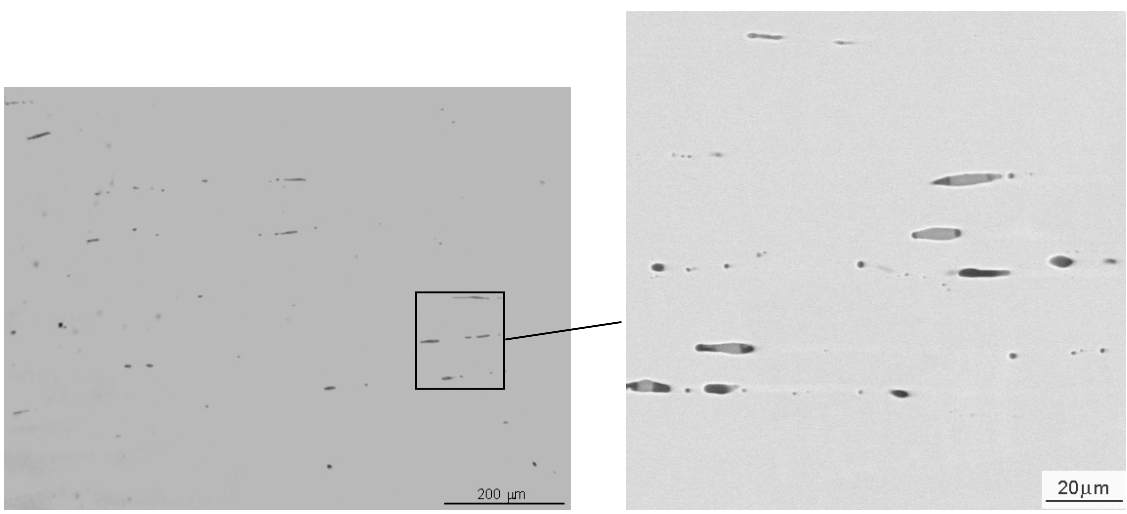
Pela análise das Figuras 4.17 a 4.22 pôde-se verificar a formação dos compostos do tipo Al_2O_3-MgO-CaO contendo um pouco de MnO. A baixa quantidade de microinclusões

encontradas, somada a predominância do composto Al_2O_3-MgO-CaO confere a baixa usinabilidade do aço ABNT 304.

4.6.2 – Exame metalográfico do aço V304 UF

A Figura 4.23 mostra duas imagens. A primeira (a) mostra a imagem obtida em microscópio óptico da superfície longitudinal da barra na condição como polida. Ela mostra o nível (quantidade e distribuição) das microinclusões nesta versão de aço. Nota-se a presença de certa quantidade de microinclusões distribuídas aleatoriamente e de formato predominantemente alongado.

A segunda imagem (b), obtida em microscópio eletrônico de varredura (MEV), é uma ampliação da área demarcada na imagem (a). Esta ampliação visou facilitar a identificação das microinclusões por análise de raios X (WDS).



(a) (b)

Figura 4.23 – (a) Imagem obtida em microscópio óptico mostrando o nível de microinclusões presentes no aço V304 UF. Superfície longitudinal da barra na condição como polida. Aumento 100X. (b) Imagem eletrônica de elétrons retroespalhados obtidas em MEV. Ampliação da área demarcada na imagem (a). Aumento 1.000X.

Observa-se na Figura 4.22 um aumento na quantidade de microinclusões encontradas no aço V304 UF em relação ao aço ABNT 304.

As Figuras 4.24 a 4.28 mostram as análises por Raios X via WDS do aço V304 UF.

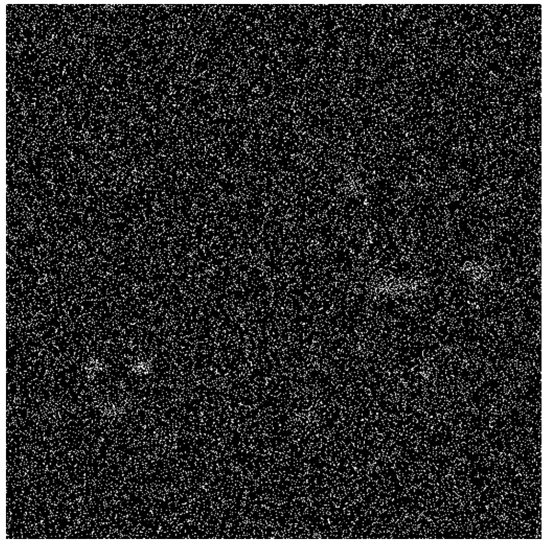


Figura 4.24 – Mapeamento por raios X do alumínio via WDS do aço V304 UF. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do alumínio e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de alumínio. Aumento: 1.000X.

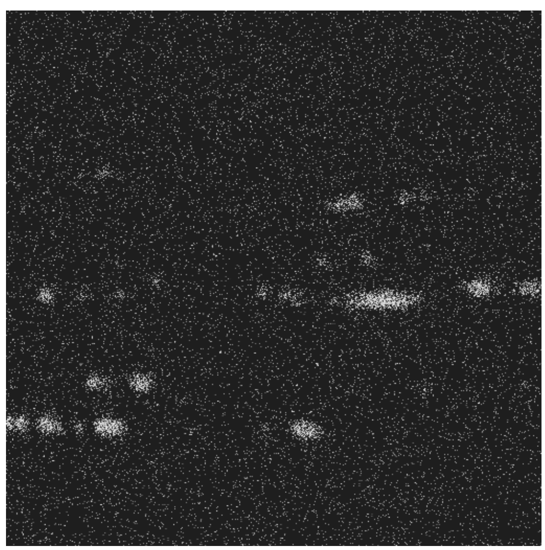


Figura 4.25 – Mapeamento por raios X do cálcio via WDS do aço V304 UF. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do cálcio e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de cálcio. Aumento: 1.000X.

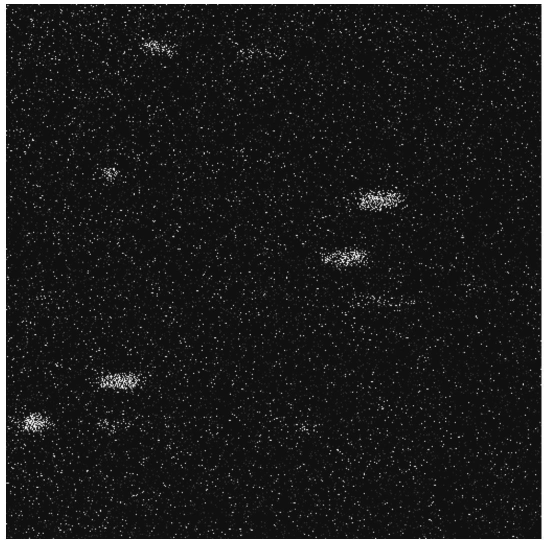


Figura 4.26 – Mapeamento por raios X do manganês via WDS do aço V304 UF. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do manganês e a intensidade de pontos brancos é proporcional a quantidade de manganês. Aumento: 1.000X.

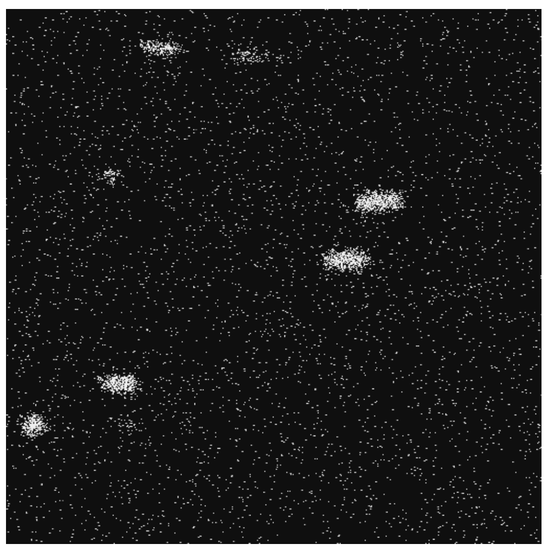


Figura 4.27– Mapeamento por raios X do enxofre via WDS do aço V304 UF. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do enxofre e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de enxofre. Aumento: 1.000X.

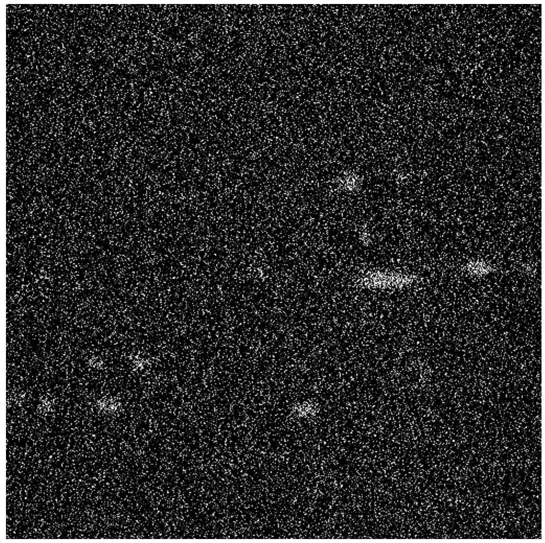


Figura 4.28– Mapeamento por raios X do silício via WDS do aço V304 UF. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição do silício e a intensidade de pontos brancos é proporcional à quantidade de silício. Aumento: 1.000X.

Pela análise das Figuras 4.24a 4.28verifica-se que no aço V304 UF há a ocorrência de microinclusões de MnS (sulfeto de manganês), que é um composto que por si só aumenta a usinabilidade dos aços, e soma-se a isto a presença de microinclusões de SiO_2-Al_2O_3-CaO as quais são menos abrasivas que os óxidos do tipo Al_2O_3-MgO-CaO. Uma constatação importante nas inclusões de MnS é o fato de possuir um certo teor de cálcio, provavelmente formando o composto CaS (sulfeto de cálcio).

O aumento das inclusões, bem como a composição química destas, confere ao aço V304 UF uma usinabilidade superior, quando comparadas ao aço ABNT 304.

4.7 Análise do Cavaco

Os resultados apresentados para os dois materiais testados até aqui podem ser explicados por intermédio da análise morfológica e metalográfica dos cavacos que foram recolhidos durante os ensaios de furação.

4.7.1 - Análise do cavaco do aço ABNT 304

A Figura 4.29mostra a morfologia do cavaco recolhido durante a furação do aço ABNT 304, com uma velocidade de corte de 17,5 m/min e avanço por volta de 0,09 mm/rev.



Figura 4.29– Cavaco recolhido na usinagem do aço ABNT 304.

Observa-se na Figura 4.29 que os cavacos apresentam-se na forma de fita com alto grau de deformação (encruamento), dificultando a sua extração. Ainda, verifica-se também que os cavacos saíram acompanhando o canal helicoidal da broca.

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram as fotomicrografias dos cavacos do aço ABNT 304.

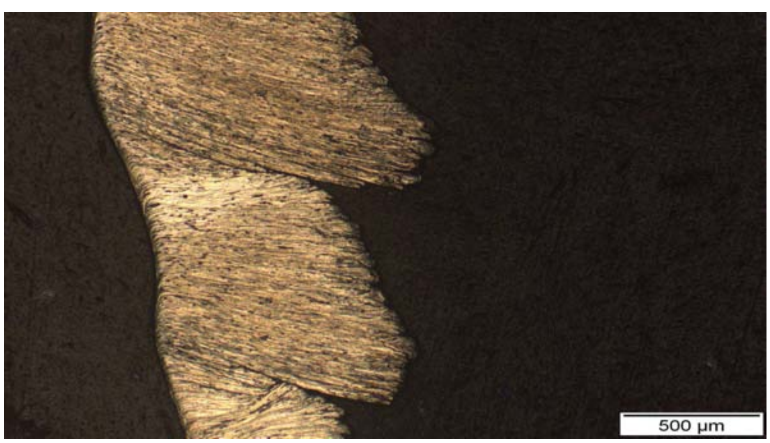


Figura 4.30 – Fotomicrografia óptica do cavaco do aço ABNT 304. Aumento de 50X. Ataque: Eletrolítico com solução de ácido oxálico a 10%.

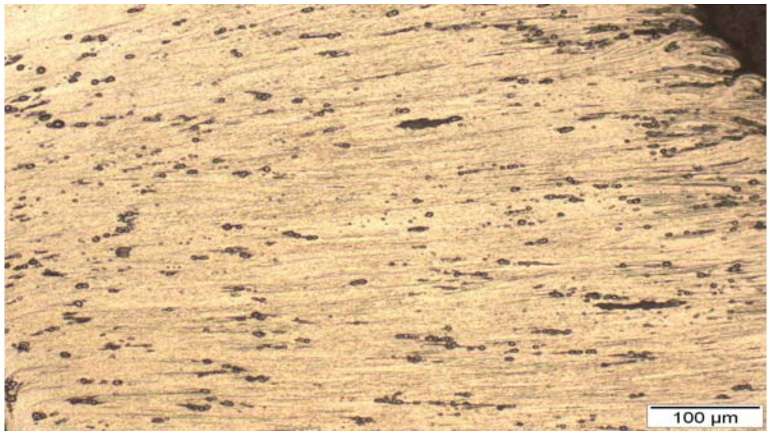


Figura 4.31 – Fotomicrografia óptica do cavaco do aço ABNT 304. Aumento de 200X. Ataque: Eletrolítico com solução de ácido oxálico a 10%.

Nas Figuras 4.30 e 4.31 observa-se uma microestrutura encruada, não sendo possível notar os contornos de grão, provocada pelo alto grau de deformação sofrida pelo cavaco. A acentuada deformação plástica provavelmente transformou a microestrutura do aço. Originalmente, o material apresentava-se com grãos poligonais austeníticos e com a deformação, ocorreu à transformação para a martensita induzida por deformação. Tal fenômeno pode ser comprovado após a atração sofrida pelo cavaco ao aproximar de um imã. A presença de martensita no material tornou o material magnético, o que comprova a transformação de fase ocorrida no cavaco. A austenita original do aço ABNT 304 não é magnética.

4.7.2 - Análise do cavaco do aço ABNT 304 UF

A Figura 4.32 mostra a morfologia do cavaco recolhido durante a furação do aço V304 UF, com velocidade de corte de 17,5 m/min e avanço de 0,09 mm/rev.

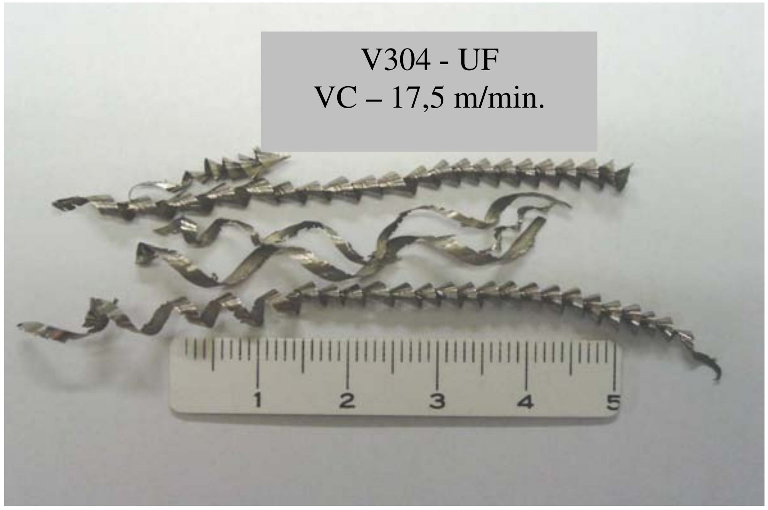


Figura 4.32 – Cavaco recolhido na usinagem do aço ABNT 304 UF.

O cavaco apresenta-se predominantemente na forma helicoidal, facilitando a sua extração durante a furação. Isto sugere que o grau de deformação sofrido pelo material foi sensivelmente menor em relação ao caso anterior.

Nas Figuras 4.33 e 4.34 mostram as fotomicrografias do aço ABNT 304UF.

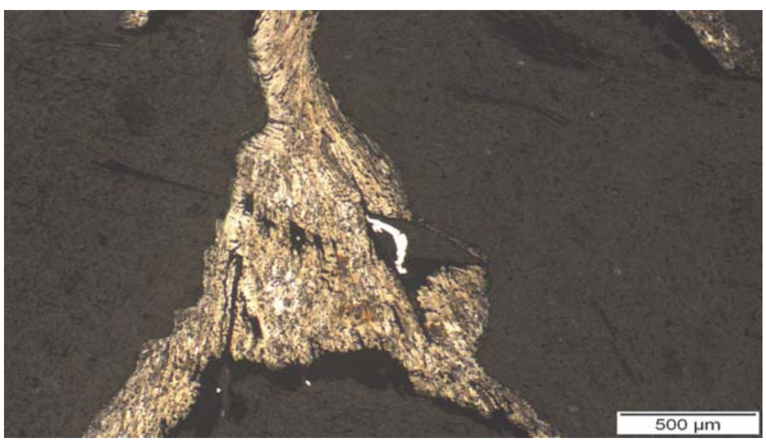


Figura 4.33 – Fotomicrografia óptica do cavaco do aço ABNT 304UF. Aumento de 50X. Ataque: Eletrolítico com solução de ácido oxálico a 10%.



Figura 4.34– Fotomicrografia óptica do cavaco do aço ABNT 304UF. Aumento de 200X. Ataque: Eletrolítico com solução de ácido oxálico a 10%.

Nas Figuras 4.33 e 4.34, principalmente na figura de maior aumento, mostram os contornos de grão no cavaco. Isto indica, de certa forma, que o material sofreu menor grau de deformação que no caso anterior (Aço ABNT 304), para as mesmas condições de usinagem. O grau de deformação ocorrido neste caso não foi suficiente para transformar acentuada quantidade da microestrutura austenítica em martensita, visto que os cavacos não eram atraídos pelo imã.

4.7.3 Comparação das durezas obtidas para os dois materiais testados

A Tabela 4.5 mostra os resultados dos ensaios de microdurezas Vickers (HV 0,3) para os cavacos selecionados para uma velocidade de corte de 17,5 m/min dos materiais testados.

Tabela 4.5 – Valores encontrados nos ensaios de microdureza Vickers (HV 0,3).

Ensaios	1	2	3	4	5	6	Média	D.P.
ABNT 304	481	429	429	481	454	467	456,8	23,78
V304 UF	385	406	406	385	454	454	415,0	31,63

Observa-se na Tabela 4.5 que a média das microdurezas medidas no cavaco obtido na usinagem do aço ABNT 304 foi maior que para o cavaco obtido do aço ABNT 304UF. Isto

comprova que o encruamento do cavaco do aço ABNT 304 foi suficiente para a formação da fase martensítica, dificultando a sua extração e produzindo uma superfície do furo com qualidade inferior e reduzindo a vida útil da broca.

4.8 A análise da aresta de corte

Com a finalidade de melhor compreender os fenômenos físico-químicos que ocorreram na ponta da ferramenta e que possam justificar a diferença de comportamento dos dois materiais usinados, as ferramentas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura. Antecedeu ao ensaio no microscópio eletrônico um processo de limpeza com uma leve esponja, água e sabão e posteriormente um banho de acetona.

Diante da taxa de ocupação do microscópio foram analisadas apenas as ferramentas que trabalharam a uma velocidade de corte de 17,5 m/min nos dois materiais e a velocidade de 33 m/min no aço inox V304 UF.

4.8.1 A influência do material da peça

Na interface entre o cavaco e a ferramenta, as condições de escorregamento ou aderência dependem do par ferramenta-peça, do tempo de usinagem e da velocidade de corte.

A ferramenta utilizada no ensaio de vida com velocidade de 17,5 m/min no aço ABNT 304 evidenciou a presença de material aderido em toda a aresta principal de corte. A Figura 4.35 mostra a superfície de saída da broca vista em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A aresta principal de corte está na horizontal e o material aderido a esta superfície se estende por toda a aresta principal de corte. A distância da aresta de corte a uma paralela que passa pela região rendilhada que determina o final da área de material aderido é de 85 μm. Não se pode afirmar que este valor médio de contato da camada de material aderido seja o comprimento de contato da zona de aderência preconizada por Trent (1989). A zona de aderência ou área de contato é difícil de ser medida.

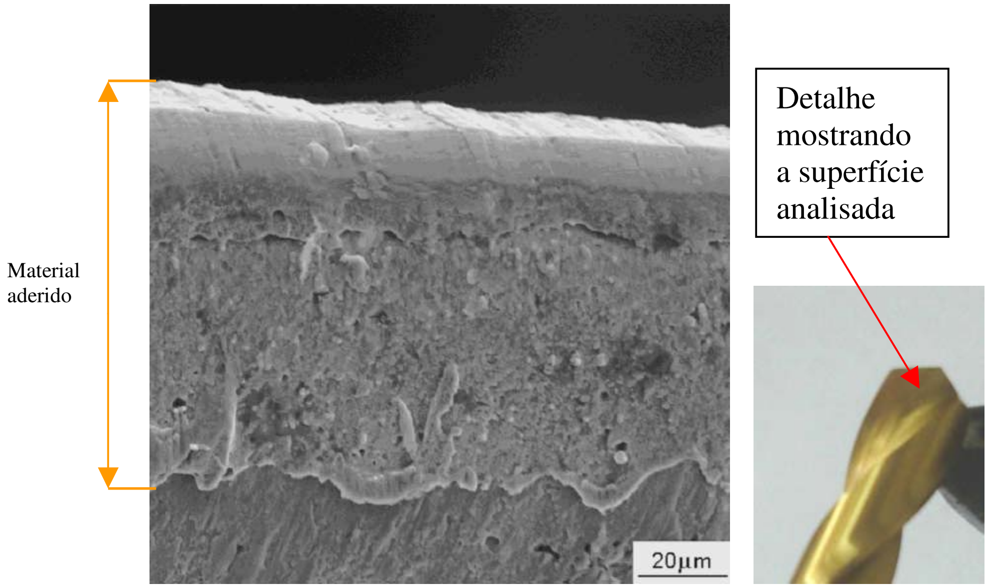


Figura 4.35 – Imagem de elétrons retroespalhados obtida em MEV da superfície de saída da ferramenta (Voltagem de aceleração – 25 kV). Aço ABNT 304. Aumento: 1.000X.

Não existe método universal para chegar em uma estimativa da área de contato, o problema diferencia-se com materiais diferentes da peça, materiais da ferramenta e condições de usinagem. O comprimento do contato é sempre maior que a espessura do cavaco não deformado. O comprimento do contato é um parâmetro muito importante, tendo uma influência muito grande em forças de corte, na vida da ferramenta e em muitos aspectos da usinabilidade.

Já para o material V304 UF a ferramenta utilizada (Figura 4.36) pode-se observar que o tamanho médio do material aderido em toda a aresta de corte é bem inferior.

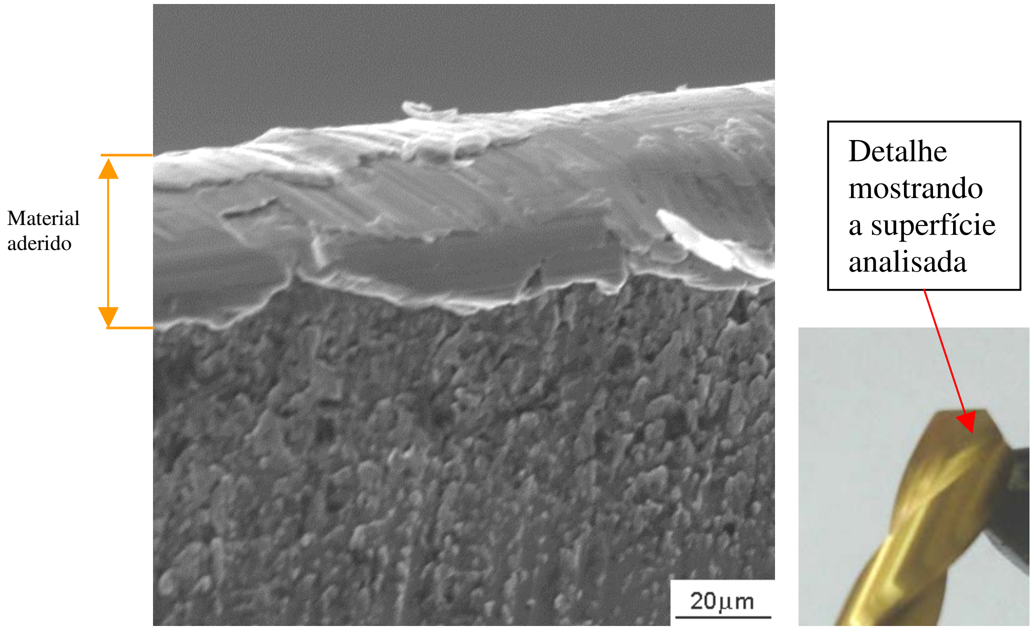


Figura 4.36- Imagem de elétrons retroespalhados obtida em MEV da superfície de saída da ferramenta (Voltagem de aceleração – 25 kV). Aço V304 UF. Aumento: 1.000X.

O valor do comprimento neste caso que é de 50 µm apresenta-se com um valor que é da mesma ordem de valor que a espessura não deformada do cavaco que neste caso é de 45 µm (metade do avanço por volta utilizado). Este valor reduzido, comparado com o valor de 85 µm do comprimento de adesão do aço inoxidável, ajuda a compreender porque o momento torsor necessário para realizar a furação no aço V304 UF é menor. Um menor comprimento de contato está associado a uma menor força de usinagem e neste caso a um menor momento torsor. A medição do comprimento de contato do aço V304 UF foi praticamente o mesmo para as velocidades analisadas no microscópio eletrônico de varredura.

4.8.2 Análise da camada aderida na superfície de saída da ferramenta

Uma análise mais refinada no microscópio eletrônico de varredura denominado WDS (*Wavelength-Dispersive Spectroscopy*), investiga a presença de elementos na superfície de saída da ferramenta que podem ajudar a explicar a diferença de usinabilidade encontrada nos ensaios de furação. As primeiras análises foram executadas nas brocas utilizadas na furação do aço inoxidável ABNT 304. O objetivo foi verificar se havia indícios dos elementos silício, manganês, cálcio e enxofre. Esses elementos são responsáveis pela formação das inclusões que facilitam o escoamento do cavaco, reduzindo os esforços provenientes do processo de usinagem.

Após uma série de análises nenhum desses elementos foi encontrado nas superfícies de saída e de folga da ferramenta. As mesmas análises feitas para o aço ABNT 304 também foram feitas para o aço V304 UF.

A Figura 4.37 mostra a superfície de saída da broca utilizada na furação do aço V304 UF e o detalhe da região analisada.

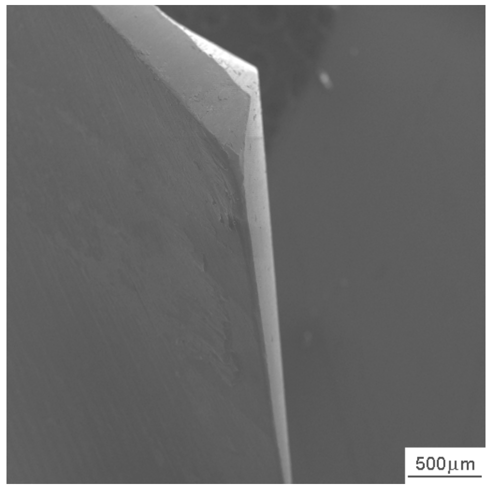


Figura 4.37 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV da superfície de saída da ferramenta e detalhe da região analisada no aço V304 UF. Aumento 40X.

A Figura 4.38 mostra a análise por raios X via EDS (*Energy-Dispersive Spectroscopy*) na região 1 da Figura 4.37.

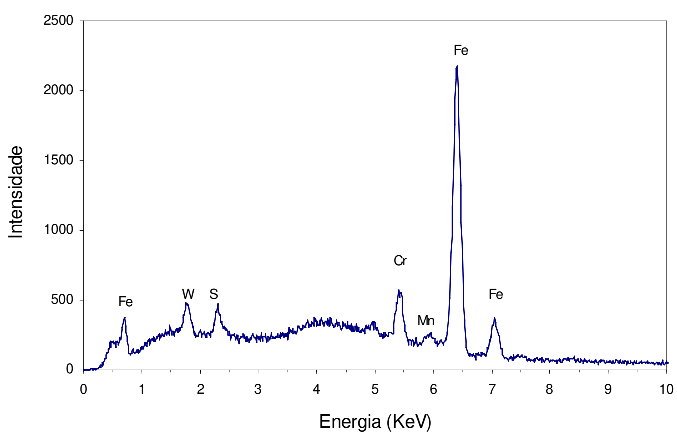


Figura 4.38 – Espectro da análise por raios X via EDS, na região 1 indicada na Figura 4.36.

A análise por raios X via EDS evidencia a presença de manganês e enxofre que são elementos que constituem as inclusões presentes no aço inoxidável, mas devido à presença de ruído, esse tipo de análise não permite verificar a presença de outros elementos que possam comprovar as baixas forças de corte.

As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 mostram as análises de raios X via WDS na superfície de saída da broca utilizada na furação do aço V304 UF.

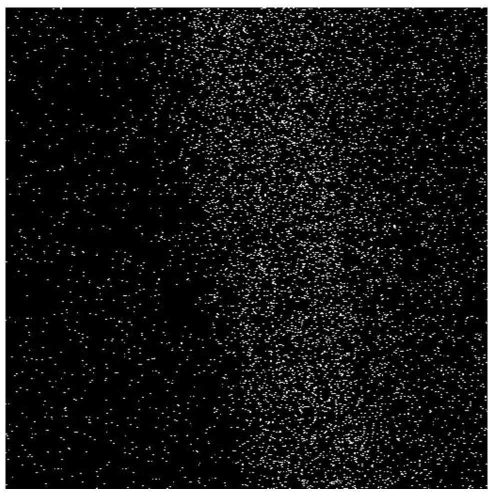


Figura 4.39 – Mapeamento por raios X do cálcio via WDS da superfície de saída da broca. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição e a intensidade que é proporcional a quantidade de cálcio. Aumento: 660X.

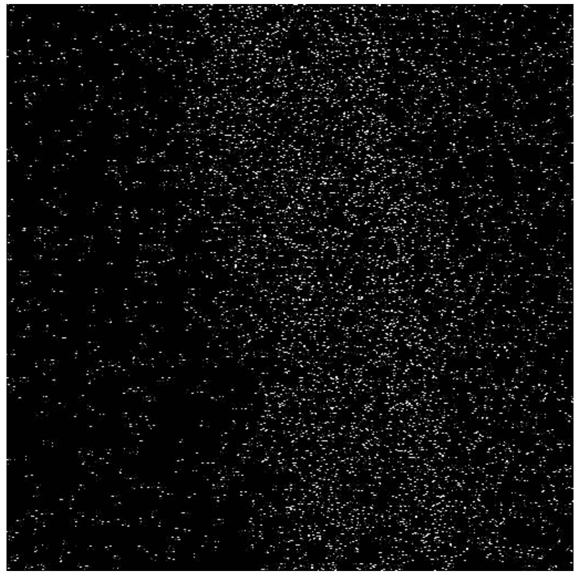


Figura 4.40 - Mapeamento por raios X do manganês via WDS da superfície de saída da broca. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição e a intensidade que é proporcional a quantidade de manganês. Aumento: 660X.

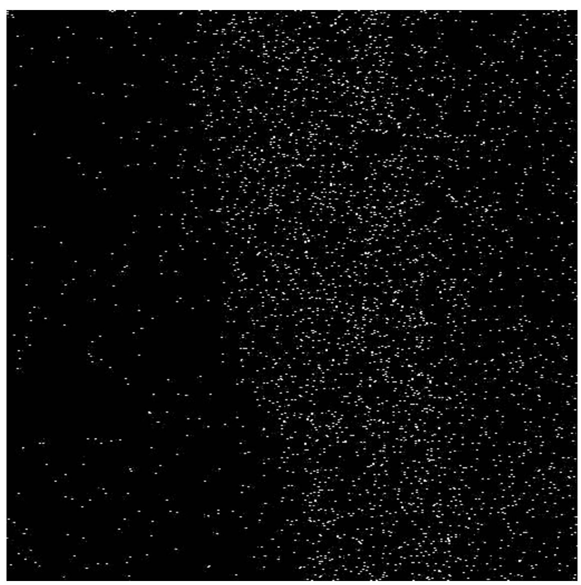


Figura 4.41 – Mapeamento por raios X do enxofre via WDS da superfície de saída da broca. Os pontos brancos na figura revelam a distribuição e a intensidade é proporcional a quantidade de enxofre. Aumento: 660X.

As análises de raios X via WDS evidenciaram a presença dos elementos cálcio, manganês e enxofre na superfície de saída da broca. Tais elementos são formadores das inclusões do tipo sulfeto de cálcio, sulfeto de manganês e óxido de cálcio, as quais isoladamente ou envelopando as inclusões duras do tipo óxido de alumínio, facilitam o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, diminuindo os esforços de usinagem.

Essas evidências ajudam a explicar os resultados obtidos nos ensaios de furação, durante a usinagem do aço V 304UF.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

As análises dos resultados obtidos neste trabalho para os aços inoxidáveis ABNT 304 e o seu similar V304 UF permite concluir que nas condições estudadas:

1. O aço inoxidável V304 UF apresentou menores valores para a força de avanço em relação aço ABNT 304;

2. O aço inoxidável V304 UF apresentou menores valores para momento torsor em relação aço ABNT 304, ou seja, para furar o aço inoxidável V304 UF, demanda-se 28% a menos de torque comparado à furação do aço ABNT 304;

3. O desgaste atingido pela broca ao furar o aço V304 UF foi sensivelmente menor que o desgaste atingido ao furar o aço ABNT 304, o que permitiu furar o aço V304 UF com velocidades ainda maiores;

4. A curva de vida obtida para os dois materiais evidencia que para furar o aço V304 UF, a vida útil da ferramenta é maior que para furar o aço ABNT 304, isto permite utilizar velocidades de corte maiores ao furar o aço V304 UF;

5. A potência necessária para furar o aço V304 UF é menor que a potência necessária para furar o aço ABNT 304 nas mesmas condições de avanço;

6. Apesar dos aços inoxidáveis austeníticos terem uma forte tendência à formação da aresta postiça de corte, verificou-se pelos resultados obtidos nos ensaios que o aço inoxidável ABNT 304 UF apresentou a menor incidência deste fenômeno, o que permitiu durante todos os ensaios, a obtenção de um comprimento usinado superior ao do aço ABNT 304;

7. Na análise metalográfica do cavaco, o aço ABNT 304 apresentou a maior média de dureza. Isto pode explicar o maior grau de encruamento sofrido e também da maior taxa de transformação martensítica (fenômeno percebido após aproximação do imã), apresentando assim, um cavaco em forma de fita de difícil extração;

8. Na análise metalográfica do cavaco, o aço V304 UF apresentou a menor média de dureza. Isto pode explicar o menor grau de encruamento sofrido e também da menor taxa de transformação martensítica (fenômeno percebido após a não atração sofrida pelo imã), apresentando assim, um cavaco em forma helicoidal de fácil extração;

9. As imagens obtidas no MEV revelaram que o comprimento de contato entre cavaco e superfície de saída da broca é menor quando se fura o aço V304 UF, comparado com o aço ABNT 304. Um menor comprimento de contato está associado a uma menor força de usinagem;

10. O efeito da melhoria da usinabilidade do aço V304 UF aconteceu quando se aumentou a velocidade de corte, pois houve a formação de uma camada protetora na superfície da ferramenta contendo elementos do tipo sulfeto de cálcio, sulfeto de manganês e óxido de cálcio, de baixo ponto de fusão, e com uma morfologia que além de reduzir o atrito entre o cavaco e a ferramenta, facilitava a formação e o escoamento dos cavacos do aço V304 UF.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir do estudo realizado neste trabalho e das conclusões obtidas, podem-se sugerir os seguintes temas para a realização de trabalhos futuros:

1. Estudar a influência da micro-geometria da aresta de corte na vida da mesma para verificar a usinabilidade dos aços inoxidáveis estudados neste trabalho;

2. Analisar o desempenho de outros materiais de ferramentas nas mesmas condições testadas neste trabalho;

3. Determinar os parâmetros de usinagem otimizados objetivando maior vida para a ferramenta e melhor qualidade dos furos;

4. Verificar o comportamento da usinabilidade dos aços inoxidáveis estudados utilizando brocas de metal duro revestidas propiciando maiores velocidades de corte.

Referências Bibliográficas

ABORN, R. Role of Addictives in the Machinability of Steel. **International Symposion on Influence of Metallurgy on Machinability**, p. 381, 1977

AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TAKANO,T. Effects of Free-cutting Additives on the Machinability of Autenitic Stainless Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v.143/144, p. 66-71, 2003.

ASM Metals Handbook, vol.16 ninth ed. p. 677,1989.

BHATTACHARYA, D. Develops in Machinability of Steel. **1st Internacional Conference on the Behaviour of Materials in Machining**, November 8/10, p. 10.1-10.7, 1998.

CHANDRASEKARAN, H.; JOHANSSON, J.; GUNNARSSON, O. Machinability of High Austenitic Stainless Steels and the Hole of chip Flow, Materials Properties and Alloy Content. In **3rd Internacional Conference on the Behaviour of Materials in Machining**, November 15/17, Conventry p.56-77,1994.

CHEN, W.C.; LIU, X.D. Study on the Various Coated Twist Drills for Stainless Steels Drilling, **Journal of Materials Processing Technology**, v.99, n.1-3, p. 226-230, 2000.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica – Materiais para Construção Mecânica. **2. ed. Mc Graw Hill**, Cap. XVII. p. 250-259, 1977.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 6ª ed.; **ABM**, Cap. XXII, Aços Austeníticos, p. 387-391, 1990.

DINIZ, A.E. Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Furação de Aços Inoxidáveis Austeníticos. Dissertação de Mestrado, Unicamp, 1985.

DINIZ, A.E.; CUPINI, N.L. Estudo do Processo de Furação de Aços Inoxidáveis Austeníticos. **Anais do 40º Congresso Anual ABM**, p. 881- 888 , 1986.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 2. ed.; Artliber Editora, Cap. 11, Furação, p. 175-193, 1999.

DOLINSEK, S. Work-hardening in the Drilling of Austenitic Stainless Steels, **Journal of Materials Processing Technology**, v.133, n. 1-2, p. 63-70, 2003.

DÖRR, J.; ECKARD, A. Tool Coatings – A Key for Innovative Machining Solutions. Trabalho Apresentado no II Colóquio Internacional de Manufatura e Gestão da Produção. **FEM/Unicamp**, p. 17-26, 2001(a).

DÖRR, J.; ECKARD, A. Tool Coatings – Increase Productivity by High Speed Drilling. Trabalho Apresentado no II Colóquio Internacional de Manufatura e Gestão da Produção. **FEM/Unicamp**, p. 27-39, 2001(b).

FANG, X.D.; ZANG, D. An Investigation of Adhering Layer Formation During Tool Wear Progression in Turning of Free-cutting Stainless Steel. **Wear**, v.107, p. 169-178, 1996.

FERRARESI, D. **Fundamento da Usinagem dos Metais**. Ed. Edgard. Blücher Ltda. SP, 1986.

FONSECA, M.A.; BARBOSA, C.A.; ABRÃO, A.M. Infuence of the Chemical Composition on the Machinability of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. Trabalho apresentado no **5th International Conference on Behavior of Materials in Machining**, UK, p. 75-78 , 2002.

GENNARI J.R., W. MACHADO, A. R., Melhorias na Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis, **Máquinas e Metais**, p. 84-98. Setembro,1999.

HELISTO, P.; HELLE, A.S.; PIETKAINEN, J. Interface phenomena between oxide layers and cemented carbide tools, **Wear**, 139, p. 225-234, 1990

KIMURA, A. *et al.* Super Starcut Stainless Steel 304BF with Bismuth. **The Bulletin of the Bismuth Institute**, 50, p. 1-12, 1986.

KOVACH C.; MOSKOWITZ A. Effects of Manganese and Sulfur on the Machinability of Martensitic Stainless Stells. **Transactions of AIME**, v. 245, oct. P. 2157, 1969.

MODENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. Vol 1 Tecnologia da Soldagem. **Escola SENAI "Nadir Dias de Figueiredo"**, Cap. 2 e 5. p. 3-36, 2001.

MARTIN, G., OCQUIDANT, G. Valima Stainless Steel Barswith Improved Machinability. **Applications of Stainless Steel 92**, June 9-11, Stockholm, v.1, p. 176-186.1992.

NORDGREN, A. MELANDER, A. Deformation Behaviour of different Types of Inclusion During Chip Formation in Turning of Quenched and Tempered Steels, **Materials Science Technology,** 5 p 940-951, 1989.

Occupacional Diseases. A guide to their Recognition **US. Department of Helth**, Education and Welfare. June, 1977.

RIOS, M.R.S. Estudo do Comportamento do Fluído Sintético na Furação de Aço Inoxidável. Tese de Mestrado. **FEM/Unicamp**, 2002.

SANDVIK COROMANT, Modern Metal Cutting, **AB Sandvik Coromant**, Sandviken Suécia, 1994.

SANDVIK COROMANT, **Machining of Stainless Steels**, Sweden, 1996.

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais**. 2. Ed; Ed. Edgard. Blücher Ltda, p. 417-424, 2006.

SULLIVAN, D.O.; COTTERELL, M. Machinability of Austenitic Stainless Steel SS303, **Journal of Materials Processing Technology**, v.124, n.1-2, p. 153-159, 2002.

TESSLER, M.B.; BARBOSA, C.A. Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis. **Metalurgia & Materiais- ABM**, v.49, No. 413. p. 32-41, 1993.

TESSLER, M.B., BARBOSA C.A, "A Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis", **Villares Metals**, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, 2002.

TIPNIS, V.; JOSEPH, R. Testing for Machinability. **Influence of Metallurgy on Machinability**, ASM, p. 11, 1975.

TRENT, E.M. **Metal Cutting**. 3.ed., Butterworths, London,1989